

Seidel, Martin

Systematik von Vershubsystemen im Brückenbau und
Variantenuntersuchung stählerner
Vorbauschnabelkonstruktionen, unter Beachtung entstehender
Montagezustände am Beispiel der Eisenbahnüberführung Stör

eingereicht als

DIPLOMARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA (FH)

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fachbereich Maschinenbau / Feinwerktechnik

Studiengang Stahl- und Metallbau

Hannover, 2010

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. T. Laufs

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. U. Heiland

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:

Bibliographische Beschreibung:

Seidel, Martin:

Systematik von Vershubsystemen im Brückenbau und Variantenuntersuchung stählerner Vorbauschnabelkonstruktionen, unter Beachtung entstehender Montagezustände am Beispiel der Eisenbahnüberführung Stör. – 2010 – 335 Seiten.

Mittweida, Hochschule Mittweida (FH),
Fachbereich Maschinenbau / Feinwerktechnik,
Diplomarbeit, 2010

Referat:

Für die Montage von Brückenbauwerken stehen vielfältige Konzepte in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen auf der Baustelle zur Verfügung. Speziell im Hinblick auf Vershubsysteme wird im Rahmen dieser Arbeit ein Überblick gegeben. Am Beispiel der Eisenbahnüberführung Stör bei Itzehoe soll im Konkreten unter Beachtung des Montageablaufs eine für den Vershubvorgang benötigte Vorbauschnabelkonstruktion zum Überqueren des Flusses anhand einer Variantenuntersuchung bemessen werden. Ziel dieser Arbeit ist die Konstruktion eines aus wirtschaftlicher sowie fertigungs- und montagetechnologischer Sicht günstig dimensionierter Vorbauschnabel.

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines	1
1.1	Ziel der Diplomarbeit.....	1
1.2	Abgrenzungskriterien	1
2	Systematik von Versuchs-systemen im Brückenbau	3
2.1	Allgemeine Anforderungen an Versuchs-systeme im Brückenbau.....	3
2.2	Versuchsprinzip unter Anwendung von Versuchs-bahnen	4
2.3	Stationäre Versuchs-systeme	9
2.4	Versuchs-systeme im Brückenbau	13
2.5	Versuchshilfen	24
2.6	Versuchs-richtungen	27
2.7	Einhaltung von Höhenkoten.....	29
2.8	Sicherung beim Brückenversuch	37
2.9	Gleitwerkstoffe für Versuchs-lager im Brückenbau	38
3	Versuchskonzept Eisenbahnüberführung Stör und Montagelastfall.....	39
3.1	Konstruktionsweise der neuen Eisenbahnüberführung.....	39
3.2	Versuchskonzept	42
3.3	Variantenaufstellung der Vorbausch-nabelkonstruktion	48
3.4	Konstruktive Grundsätze.....	51
4	Grundlagen der Nachweisführung	52
4.1	Allgemeines.....	52
4.2	Grundlagen der Einwirkungen	52
4.3	Grundlagen der Schnittkraftermittlung.....	55
4.4	Grundlagen der FEM – Modellierung	56
4.5	Grundlagen der Nachweisführung.....	58
4.5.1	Nachweisführung mittels analytischer Berechnung.....	58
4.5.2	Nachweisführung mittels Finite Elemente Methode.....	68
4.5.2.1	Eingabeparameter FEM	68
4.5.2.2	Ausgabeeigenschaften FEM.....	68
5	Lastfallbildung und Schnittkraftermittlung	71
5.1	Lastfallbildung	71
5.2	Ermittlung der Auflagerreaktionen	76
5.3	Ermittlung der Schnittkräfte zur analytische Berechnung	77

6	Variantenuntersuchung Vorbauschnabel	79
6.1	Allgemeines.....	79
6.2	Verbandsfelder und Verbandsebenen.....	81
6.2.1	Allgemeines	81
6.2.2	Auswirkungen der Verbandfelderanzahl	81
6.2.3	Auswirkungen der Verbandsebenen	85
6.2.4	Fazit und Festlegungen.....	88
6.3	Nachweis der Tragsicherheit	89
6.3.1	Nachweis der globalen Spannungen	89
6.3.1.1	Spannung infolge Lasteinleitung der Zuglasche.....	89
6.3.1.2	Schubspannung im Stegblech	95
6.3.1.3	Spannung im Obergurt.....	97
6.3.1.4	Spannung im Untergurt	104
6.3.2	Nachweis der lokalen Spannungen.....	106
6.3.2.1	Lokale Spannungen im Untergurt	106
6.3.2.2	Konzentrierte Lasteinleitung im Stegblech	109
6.3.3	Zusammenfassung globaler und lokaler Spannungen	112
6.3.4	Stabilitätsuntersuchung	113
6.3.4.1	Nachweis der Beulsicherheit.....	113
6.3.4.2	Nachweis Biegedrillknicken.....	150
6.4	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit	154
6.4.1	Nachweis der globalen Verformung	156
6.4.2	Nachweis der lokalen Verformung	157
7	Anschlussstatik.....	164
8	Kalkulation	172
8.1	Kalkulation Bauteilgewicht und Materialkosten	172
8.2	Ermittlung der Fertigungskosten.....	181
8.3	Gesamtkostenermittlung.....	190
9	Auswertung der Ergebnisse	192
9.1	Auswertung der konstruktiven Unterschiede	192
9.2	Auswertung der Kalkulation	195
9.3	Vergleich FEM zu analytischer Berechnungsmethode	201
10	Resümee.....	210

Anhang A.....	211
A 1 Ein- und Ausgabewerte zur Ermittlung der Auflagerraktionen	212
A 1.1 Eingabe Lastfälle	212
A 1.2 Lastfallkombinationen.....	216
A 1.3 Ausgabewerte der Lagerreaktionen	216
A 2 Ein- und Ausgabewerte zur Ermittlung der Schnittkräfte am Vorbauschnabel	221
A 2.1 Einwirkungen Hauptträger zur analytischen Berechnung.....	221
A 2.2 Einwirkungen Hauptträger für FE-Berechnung	223
A 2.3 Schnittkräfte der Verbände.....	226
 Anhang B.....	 236
B1 Grenzspannungen für Grundwerkstoff und Schweißverbindungen	237
B2 Zugehörige Berechnungen zu Kapitel 6.2	239
B3 Zugehörige Berechnungen zu Kapitel 6.3.1.1	244
B4 Zugehörige Berechnungen zu Kapitel 6.3.1.3	250
B5 Zugehörige Berechnungen zu Kapitel 6.3.1.4	253
B6 Zugehörige Berechnungen zu Kapitel 6.3.2.2	254
B7 Zugehörige Berechnungen zu Kapitel 6.3.4.1	255
B8 Zugehörige Berechnungen zu Kapitel 6.3.4.2	293
 Anhang C.....	 295
C1 Zugehörige Ergebnisse zu Kapitel 6.3.1.3.....	296
C2 Zugehörige Ergebnisse zu Kapitel 6.3.4.1.....	298
C3 Zugehörige Ergebnisse zu Kapitel 6.4.2.....	307
 Anhang D.....	 311
 Literaturverzeichnis	 332
 Selbständigkeitserklärung.....	 334
 Danksagung	 335

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema Vershubprinzip	3
Abbildung 2: Vershubprinzip unter Anwendung einer Vershubbahn	4
Abbildung 3: Beispiel SEH - Vershubbahn.....	5
Abbildung 4: Rollwagenkonstruktion SEH.....	5
Abbildung 5: Schwere und leichte Ausführung einer Vershubgleitbahn	6
Abbildung 6: Querschnitt APS-System	6
Abbildung 7: Einsatz FLUIDTS®-System im Brückenbau	7
Abbildung 8: Gleitschuh Mammoet mit Hubhydraulik (links) und Vershubbahn (rechts) ...	8
Abbildung 9: Schema stationäre Vershublager	9
Abbildung 10: Aufbau Vershubwippe Fa. Donges Stahlbau	10
Abbildung 11: Einsatz Vershubwippe beim Bau der Talbrücke Elben.....	10
Abbildung 12: Vershubgleitlager EIFFEL	11
Abbildung 13: Grundprinzip des querverschieblichen Längsvershublagers.....	12
Abbildung 14: Querschnitt des querverschieblichen Längsvershublagers	12
Abbildung 15: Vershubstation beim Bau der Haseltalbrücke bei Suhl.....	12
Abbildung 16: Gliederung Vershubsysteme	13
Abbildung 17: Funktionsprinzip Litzenheber	14
Abbildung 18: Vershubprinzip unter Verwendung von Litzenhebern	15
Abbildung 19: Vershub mittels Litzenheber	15
Abbildung 20: Vershubhydraulik mit Zugstange.....	16
Abbildung 21: Querschnitt und Seitenansicht Vershubbahn SLEE-System.....	17
Abbildung 22: Einlegen der Hydraulik in die Vershubbahn.....	17
Abbildung 23: Ausfahren des Spreizers zum Fixieren der Hydraulik.....	17
Abbildung 24: Ausfahren des Kolbens zum Bewegen der Last.....	18
Abbildung 25: Lösen der Klemmen durch Einfahren des Spreizers	18
Abbildung 26: Bewegung der Hydraulik zum nächsten Bohrloch	18
Abbildung 27: Push-Pull-Unit Anlage der Firma Hebetec	19
Abbildung 28: Vershubprinzip Push-Pull-Unit von Hebetec.....	19
Abbildung 29: Push-Pull-Unit Anlage von Mammoet	20
Abbildung 30: Funktionsprinzip Hub/-Schubanlage	22
Abbildung 31: Aufbau Enerpac-Hydrauliksystem.....	22
Abbildung 32: Vershubprinzip Enerpac Anlage.....	23
Abbildung 33: SPMT.....	24
Abbildung 34: Vershubprinzip SPMT.....	25
Abbildung 35: Vershubprinzip Ponton	26
Abbildung 36: Prinzip Längs- und Quervorschub	27
Abbildung 37: Prinzip Eindrehen von Brücken.....	28

Abbildung 38: Verschubbahn mit Radius zum Eindrehen von Brücken	28
Abbildung 39: Übersicht Vorbauschnabelarten.....	30
Abbildung 40: Vershubprinzip unter Verwendung eines geteilten VBS.....	32
Abbildung 41: Vershubprinzip unter Verwendung eines manipulierbaren VBS.....	33
Abbildung 42: Vershubprinzip Vershubpendel	35
Abbildung 43: Ballastieren von Brücken	36
Abbildung 44: Seitenansicht EÜ Stör	39
Abbildung 45: Schnitt in Brückenmitte.....	40
Abbildung 46: Detail Brückenfußpunkt.....	41
Abbildung 47: Ausgangszustand Vershub	45
Abbildung 48: Vershubschritt 1.....	45
Abbildung 49: Vershubschritt 2.....	46
Abbildung 50: Vershubschritt 3.....	46
Abbildung 51: Endzustand nach erfolgtem Einschub	47
Abbildung 52: Endzustand nach Abschluss aller Baumaßnahmen	47
Abbildung 53: Anschluss VBS an Brückenfußpunkt	51
Abbildung 54: Statisches System zur Bestimmung der Lagerreaktion, Fall 1	52
Abbildung 55: Statisches System zur Bestimmung der Lagerreaktion, Fall 2.....	53
Abbildung 56: Definition der Freiheitsgrade der Auflager	53
Abbildung 57: FEM Modell	57
Abbildung 58: Idealisierung der Beulfeldhöhe zum Nachweis der Beulsicherheit.....	60
Abbildung 59: Struktogramm vereinfachter BDK-Nachweis	61
Abbildung 60: Struktogramm Beulsicherheitsnachweis	63
Abbildung 61: Tabelle 1 für Beulsicherheitsnachweis.....	64
Abbildung 62: Diagramm für Beulsicherheitsnachweis nach [14].....	64
Abbildung 63: Tabelle 2 für Beulsicherheitsnachweis nach [3].....	65
Abbildung 64: Struktogramm Biegeknicknachweis	67
Abbildung 65: Definition der lokalen Achsensysteme der Einzelflächen	79
Abbildung 66: Bezeichnung der VBS - Bauteile.....	80
Abbildung 67: Lokale Spannung im Untergurt infolge Seitenführungskraft.....	83
Abbildung 68: Verformung Untergurt infolge Seitenführungskraft	84
Abbildung 69: Vergleich der Verformungen bei einer und zwei Verbandsebenen	86
Abbildung 70: Schubspannungskonzentration im Stegblech unterhalb der Zuglasche	90
Abbildung 71: Normalspannungskonzentration im Bereich der Zuglasche	90
Abbildung 72: Spannungsverlauf der Vergleichsspannung im Stegblech im Bereich der Zuglasche	91
Abbildung 73: Grafik zum analytischen Nachweis der Lasteinleitung	93
Abbildung 74: Schubspannungsverlauf an der Schnabelspitze nach FE-Methode.....	95
Abbildung 75: Vergleichsspannung im Obergurt	97

Abbildung 76: Nachweisstellen zur Bestimmung der Aufdickung im Obergurt.....	100
Abbildung 77: Spannung im Untergurt, Materialdickenkombination 1	104
Abbildung 78: Spannung im Untergurt, Materialdickenkombination 2	104
Abbildung 79: Lokale Spannung im Untergurt	106
Abbildung 80: Aufteilung der Einwirkung zur Bestimmung der Unterflanschspannung ...	107
Abbildung 81: Konzentrierte Lasteinleitung im Stegblech nach FE-Methode.....	109
Abbildung 82: Schnitt 1-1	110
Abbildung 83: Spannungsverlauf der Normalspannung σ_x	112
Abbildung 84: Spannungsverlauf der Schubspannung τ	112
Abbildung 85: Spannungsverlauf der Vergleichsspannung σ_v	112
Abbildung 86: Darstellung der Beulgefährdung im FEM.....	113
Abbildung 87: Vergleich der Beulfiguren in Abhängigkeit der Laststellung	114
Abbildung 88: Einfluss der Obergurtdicke auf das Beulverhalten.....	115
Abbildung 89: Bezeichnung der Beulfelder	116
Abbildung 90: Beulfiguren mit zusätzlicher Quersteife bei $x=7,1\text{m}$	117
Abbildung 91: Beulfiguren mit Quersteife und Längssteife im TF1.....	118
Abbildung 92: Darstellung des Biegedrillknickens im FEM.....	150
Abbildung 93: Vergleich FEM-Ergebnis mit 3. Eulerschen Fall	152
Abbildung 94: Statisches System für Ersatzstabverfahren.....	152
Abbildung 95: Abgleiten des Untergurts bei übermäßiger Verformung	154
Abbildung 96: Verformungsbeschränkung für globale und lokale Verformung	155
Abbildung 97: Darstellung der globalen Verformung im FEM.....	156
Abbildung 98: Lokale Verformung infolge Flansch- und Stegbiegung.....	157
Abbildung 99: Stabwerksmodell zur Bestimmung der lokalen Verformung.....	162
Abbildung 100: Ansatz der Einwirkungen an der Stelle $x=7,5\text{m}$	162
Abbildung 101: Lokale Verformung im Querschnitt mittels RStab [28].....	163
Abbildung 102: Anschluss Vorbauschnabel an Brückenfußpunkt	166
Abbildung 103: Zug-/Drucklasche	166
Abbildung 104: Querkraftanschluss	168
Abbildung 105: Definition der Bearbeitungsschritte	181
Abbildung 106: Struktogramm zur Variantenaufstellung.....	194
Abbildung 107: Statisches System zur Bestimmung der Auflagerreaktion, Fall 1.....	212
Abbildung 108: Statisches System zur Bestimmung der Auflagerreaktion, Fall 2.....	212
Abbildung 109: Lastfall Eigengewicht Brückenkonstruktion	213
Abbildung 110: Lastfall Eigengewicht Vorbauschnabel	213
Abbildung 111: Lastfall Hängeraussteifung.....	214
Abbildung 112: Lastfall Wind auf Brückenkonstruktion.....	214
Abbildung 113: Lastfall Wind auf Vorbauschnabel	214
Abbildung 114: Lastfall Baustellenverkehr	215

Abbildung 115: Lastfall Ballastieren	215
Abbildung 116: Lagerreaktionen am Vorbauschnabel für 4,0kN/m zum Nachweis GZT .	216
Abbildung 117: Lagerreaktion am Vorbauschnabel für 4,5kN/m zum Nachweis GZT	217
Abbildung 118: Lagerreaktion am Vorbauschnabel für 5,0kN/m zum Nachweis GZT	217
Abbildung 119: Lagerreaktion am Vorbauschnabel für 5,5kN/m zum Nachweis GZT	218
Abbildung 120: Lagerreaktion am Vorbauschnabel für 4,0kN/m zum Nachweis GZG.....	219
Abbildung 121: Lagerreaktion am Vorbauschnabel für 4,5kN/m zum Nachweis GZG.....	219
Abbildung 122: Lagerreaktion am Vorbauschnabel für 5,0kN/m zum Nachweis GZG.....	220
Abbildung 123: Lagerreaktion am Vorbauschnabel für 5,5kN/m zum Nachweis GZG.....	220
Abbildung 124: Stabwerksmodell zur analytischen Berechnung	222
Abbildung 125: Hauptachsen Winkelprofil	226
Abbildung 126: Stabbezeichnung bei einem Verbandsfeld als K-Verband	227
Abbildung 127: Stabbezeichnung bei zwei Verbandsfeldern als K-Verband.....	228
Abbildung 128: Stabbezeichnung bei drei Verbandsfeldern als K-Verband.....	229
Abbildung 129: Stabbezeichnung bei einem Verbandsfeld als Kreuzverband.....	230
Abbildung 130: Stabbezeichnung bei zwei Verbandsfeldern als Kreuzverband	231
Abbildung 131: Stabbezeichnung bei drei Verbandsfeldern als Kreuzverband	232
Abbildung 132: Stabbezeichnung der zweiten Verbandsebene an der Schnabelspitze ..	233
Abbildung 133: Biegemomentenverlauf M_z im Untergurt bei einem Verbandsfeld.....	234
Abbildung 134: Biegemomentenverlauf M_z im Untergurt bei zwei Verbandsfeldern.....	234
Abbildung 135: Biegemomentenverlauf M_z im Untergurt bei drei Verbandsfeldern	235

Zeichnungsverzeichnis

Zeichnung 1: Isometrie Vorbauschnabel.....	328
Zeichnung 2: Einzelteile	329
Zeichnung 3: Zuschnittplan 1	330
Zeichnung 4: Zuschnittplan 2	331

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Normative Grundlagen der statischen Nachweisführung	58
Tabelle 2: Definition der Vergleichsspannung.....	70
Tabelle 3: Eigengewicht für die Baugruppen der Brücke.....	71
Tabelle 4: Windlasten für die Baugruppen der Brücke	74
Tabelle 5: Schnittkräfte Hauptträger 1 für Tragsicherheitsnachweis	76
Tabelle 6: Schnittkräfte Hauptträger 2 für Tragsicherheitsnachweis	76
Tabelle 7: Schnittkräfte Hauptträger 1 für Gebrauchstauglichkeitsnachweis	76
Tabelle 8: Schnittkräfte Hauptträger 2 für Gebrauchstauglichkeitsnachweis	77
Tabelle 9: Ergebnis der Profilbemessung bei einer Verbandsebene	82
Tabelle 10: Gewichtsermittlung für K-Verband	82
Tabelle 11: Gewichtsermittlung für Kreuzverband	82
Tabelle 12: Auswirkung der Verbandsfelderzahl auf die Spannungen im Untergurt.....	84
Tabelle 13: Profilwahl der zweiten Verbandsebene.....	85
Tabelle 14: Gegenüberstellung der Verformung für eine und zwei Verbandsebenen	86
Tabelle 15: Gewichtsermittlung der Verbände an der Schnabelspitze.....	87
Tabelle 16: Einfluss der Dicke des Obergurts auf die Spannungen im Stegblech	91
Tabelle 17: Einfluss der Dicke des Untergurts auf die Spannungen im Stegblech	92
Tabelle 18: Lasteinleitungslänge im Stegblech nach FE-Methode.....	92
Tabelle 19: Lasteinleitungslänge nach analytischer Berechnung.....	94
Tabelle 20: Schubspannung im Stegblech an der Schnabelspitze nach FE-Methode.....	95
Tabelle 21: Schubspannung im Stegblech nach analytischer Berechnung.....	96
Tabelle 22: Länge der Aufdickung im Obergurt für S235 nach FE-Methode.....	99
Tabelle 23: Länge der Aufdickung im Obergurt für S355 nach FE-Methode.....	99
Tabelle 24: Nachweis der b/t -Verhältnisse im Druckgurt.....	101
Tabelle 25: Länge der Aufdickung im Obergurt für S235 nach analytischer Berechnung	103
Tabelle 26: Länge der Aufdickung im Obergurt für S355 nach analytischer Berechnung	103
Tabelle 27: Spannung im Untergurt nach analytischer Berechnung	105
Tabelle 28: Lokale Spannung im Untergurt nach analytischer Berechnung.....	108
Tabelle 29: Bezeichnung der zugehörigen Abbildungen	109
Tabelle 30: Vergleichsspannung infolge konzentrierter Lasteinleitung	111
Tabelle 31: Einfluss der Laststellung auf das Beulverhalten nach FE-Methode	114
Tabelle 32: Einfluss der Obergurtdicke auf das Beulverhalten.....	115
Tabelle 33: Einfluss der Untergurtdicke auf das Beulverhalten nach FE-Methode	116
Tabelle 34: Beulverhalten mit zusätzlicher Quersteife bei $x=7,1\text{m}$ nach FE-Methode.....	117
Tabelle 35: Beulverhalten mit Quer- und Längssteife nach FE-Methode.....	118
Tabelle 36: Zusammenfassung der zusätzlichen Aussteifungsmaßnahmen zur Sicherstellung der Beulsicherheit für S235 nach FE-Methode	130

Tabelle 37: Zusammenfassung der zusätzlichen Aussteifungsmaßnahmen zur Sicherstellung der Beulsicherheit für S355 nach FE-Methode	131
Tabelle 38: Nachweis der b/t-Verhältnisse im Stegblech für S235.....	133
Tabelle 39: Nachweis der b/t-Verhältnisse im Stegblech für S355.....	133
Tabelle 40: Nachweis der Verhältnisse h/s	133
Tabelle 41: Zusammenfassung der zusätzlichen Aussteifungsmaßnahmen zur Sicherstellung der Beulsicherheit für S235 nach analytischer Berechnung ..	148
Tabelle 42: Zusammenfassung der zusätzlichen Aussteifungsmaßnahmen zur Sicherstellung der Beulsicherheit für S355 nach analytischer Berechnung ..	149
Tabelle 43: Verzweigungslastfaktor für den Versagensfall Biegedrillknicken.....	151
Tabelle 44: Ergebnis Biegedrillknicknachweis für S235 nach analytischer Berechnung .	153
Tabelle 45: Ergebnis Biegedrillknicknachweis für S355 nach analytischer Berechnung .	153
Tabelle 46: Ergebnisse der globalen Verformung nach Theorie II.Ordnung	156
Tabelle 47: Zusätzliche Verformungssteifen für den Bereich x=0m bis x=5m.....	161
Tabelle 48: Zusätzliche Verformungssteifen für den Bereich x=5m bis x=10m	161
Tabelle 49: Lokale Verformung im Untergurt nach analytischer Berechnung	163
Tabelle 50: Konstruktionseigengewicht der einzelnen Baugruppen.....	174
Tabelle 51: Konstruktionseigengewicht der einzelnen Baugruppen - Fortsetzung	175
Tabelle 52: Aufstellung der Blechtafelgewichte	176
Tabelle 53: Aufstellung der Blechtafelgewichte - Fortsetzung.....	177
Tabelle 54: Aufstellung der Profildgewichte	177
Tabelle 55: Fertigungszeit für Bohrzeit aller Bauteile außer Anschlussbleche	186
Tabelle 56: Fertigungszeit für bohren der Anschlussbleche.....	186
Tabelle 57: Einflüsse einzelner Parameter auf die Nachweisstellen	193
Tabelle 58: Gegenüberstellung der aussteifenden Maßnahmen für S355 zur Gewährleistung der Beulsicherheit nach FEM und analytischer Berechnung	205
Tabelle 59: Schnittkräfte Hauptträger 1 für Tragsicherheitsnachweis	221
Tabelle 60: Schnittkräfte Hauptträger 2 für Tragsicherheitsnachweis	221
Tabelle 61: Schnittkräfte Hauptträger 1 für Gebrauchstauglichkeitsnachweis	221
Tabelle 62: Schnittkräfte Hauptträger 2 für Gebrauchstauglichkeitsnachweis	221
Tabelle 63: Eingabewerte FEM zum Nachweis im GZT für Hauptträger 1.....	223
Tabelle 64: Eingabewerte FEM zum Nachweis im GZT für Hauptträger 2.....	224
Tabelle 65: Eingabewerte FEM zum Nachweis im GZG für Hauptträger 1	224
Tabelle 66: Eingabewerte FEM zum Nachweis im GZG für Hauptträger 2.....	225
Tabelle 67: Schnittkräfte bei einem Verbandsfeld als K-Verband	227
Tabelle 68: Schnittkräfte bei zwei Verbandsfeldern als K-Verband.....	228
Tabelle 69: Schnittkräfte bei drei Verbandsfeldern als K-Verband.....	229
Tabelle 70: Schnittkräfte bei einem Verbandsfeld als Kreuzverband.....	230
Tabelle 71: Schnittkräfte bei zwei Verbandsfeldern als Kreuzverband	231

Tabelle 72: Schnittkräfte bei drei Verbandsfeldern als Kreuzverband.....	232
Tabelle 73: Schnittkräfte der zweiten Verbandsebene an der Schnabelspitze	233
Tabelle 74: Biegemomente M_z im Untergurt bei einem Verbandsfeld.....	234
Tabelle 75: Biegemomente M_z im Untergurt bei zwei Verbandsfeldern	235
Tabelle 76: Biegemomentenverlauf M_z im Untergurt bei drei Verbandsfeldern.....	235
Tabelle 77: Profilbemessung für K-Verband - Biegeknicknachweis	239
Tabelle 78: Profilbemessung für Kreuzverband - Spannungsnachweis	240
Tabelle 79: Profilbemessung für Kreuzverband - Biegeknicknachweis.....	240
Tabelle 80: Profilbemessung der zweiten Verbandsebene - Biegeknicknachweis	241
Tabelle 81: Profilbemessung der zweiten Verbandsebene - Spannungsnachweis.....	242
Tabelle 82: Spannung im Untergurt infolge Seitenführungskraft für 1 und 2 Verbandsfelder	243
Tabelle 83: Spannung im Untergurt infolge Seitenführungskraft für 3 Verbandsfelder....	243
Tabelle 84: Bestimmung der erforderlichen Stegdicke	244
Tabelle 85: Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für $s=22\text{mm}$ in S235 .	245
Tabelle 86: Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für $s=15\text{mm}$ in S235 .	245
Tabelle 87: Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für $s=12\text{mm}$ in S235 .	246
Tabelle 88: Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für $s=10\text{mm}$ in S235 .	246
Tabelle 89: Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für $s=8\text{mm}$ in S235 ...	247
Tabelle 90: Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für $s=15\text{mm}$ in S355 .	247
Tabelle 91: Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für $s=12\text{mm}$ in S355 .	248
Tabelle 92: Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für $s=10\text{mm}$ in S355 .	248
Tabelle 93: Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für $s=8\text{mm}$ in S355 ...	249
Tabelle 94: Nachweisstelle 1 zur Festlegung der Aufdickung im Obergurt.....	250
Tabelle 95: Nachweisstelle 2 zur Festlegung der Aufdickung im Obergurt in S235.....	251
Tabelle 96: Nachweisstelle 2 zur Festlegung der Aufdickung im Obergurt in S355.....	252
Tabelle 97: Bestimmung der globalen Spannung im Untergurt.....	253
Tabelle 98: Spannung infolge konzentrierter Lasteinleitung.....	254
Tabelle 99: Spannungsverhältnis im Stegblech in S235.....	255
Tabelle 100: Spannungsverhältnis im Stegblech in S355.....	255
Tabelle 101: Beulwerte für $s=15\text{mm}$ in S235, unversteift	256
Tabelle 102: Beulwerte für $s=15\text{mm}$ in S235, unversteift - Fortsetzung.....	257
Tabelle 103: Beulwerte für $s=12\text{mm}$ in S235, unversteift	258
Tabelle 104: Beulwerte für $s=12\text{mm}$ in S235, unversteift - Fortsetzung.....	259
Tabelle 105: Beulwerte für $s=10\text{mm}$ in S235, unversteift	260
Tabelle 106: Beulwerte für $s=8\text{mm}$ in S235, unversteift	261
Tabelle 107: Beulwerte für $s=12\text{mm}$ in S355, unversteift	262
Tabelle 108: Beulwerte für $s=10\text{mm}$ in S355, unversteift	263
Tabelle 109: Beulwerte für $s=8\text{mm}$ in S355, unversteift	264

Tabelle 110: Beulwerte TF1 für $s=12\text{mm}$ in S235, mit Quersteife	265
Tabelle 111: Beulwerte TF2 für $s=12\text{mm}$ in S235, mit Quersteife	266
Tabelle 112: Beulwerte TF1 für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quersteife	267
Tabelle 113: Beulwerte TF2 für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quersteife	268
Tabelle 114: Beulwerte TF1 für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quersteife	269
Tabelle 115: Beulwerte TF2 für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quersteife	270
Tabelle 116: Beulwerte TF1 für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quersteife	271
Tabelle 117: Beulwerte TF2 für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quersteife	272
Tabelle 118: Beulwerte TF1 für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quersteife	273
Tabelle 119: Beulwerte TF2 für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quersteife	274
Tabelle 120: Beulwerte TF1 für $s=12\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife.....	275
Tabelle 121: Beulwerte TF2 für $s=12\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife.....	276
Tabelle 122: Beulwerte TF1 für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife.....	277
Tabelle 123: Beulwerte TF2 für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife.....	278
Tabelle 124: Beulwerte TF1 für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife.....	279
Tabelle 125: Beulwerte TF2 für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife.....	280
Tabelle 126: Beulwerte TF1 für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife.....	281
Tabelle 127: Beulwerte TF2 für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife.....	282
Tabelle 128: Beulwerte TF1 für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife.....	283
Tabelle 129: Beulwerte TF2 für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife.....	284
Tabelle 130: Interpolierte Beulwerte für $s=15\text{mm}$ in S235, unversteift.....	285
Tabelle 131: Interpolierte Beulwerte für $s=12\text{mm}$ in S235, unversteift.....	285
Tabelle 132: Interpolierte Beulwerte für $s=10\text{mm}$ in S235, unversteift.....	286
Tabelle 133: Interpolierte Beulwerte für $s=8\text{mm}$ in S235, unversteift.....	286
Tabelle 134: Interpolierte Beulwerte S355, unversteift	287
Tabelle 135: Interpolierte Beulwerte für $s=12\text{mm}$ in S235, mit Quersteife	288
Tabelle 136: Interpolierte Beulwerte für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quersteife	288
Tabelle 137: Interpolierte Beulwerte für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quersteife	289
Tabelle 138: Interpolierte Beulwerte für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quersteife	289
Tabelle 139: Interpolierte Beulwerte für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quersteife	290
Tabelle 140: Interpolierte Beulwerte für $s=12\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife....	290
Tabelle 141: Interpolierte Beulwerte für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife....	291
Tabelle 142: Interpolierte Beulwerte für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife.....	291
Tabelle 143: Interpolierte Beulwerte für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife....	292
Tabelle 144: Interpolierte Beulwerte für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife.....	292
Tabelle 145: Vereinfachter BDK-Nachweis für S235	293
Tabelle 146: Vereinfachter BDK-Nachweis für S355	294
Tabelle 147: Spannung im Obergurt für $t_{OG}=35\text{mm}$ in S235 ohne Materialaufdickung....	296
Tabelle 148: Spannung im Obergurt für $t_{OG}=30\text{mm}$ in S235 ohne Materialaufdickung....	296

Tabelle 149: Spannung im Obergurt für $t_{OG}=25\text{mm}$ in S235 ohne Materialaufdickung....	296
Tabelle 150: Spannung im Obergurt für $t_{OG}=30\text{mm}$ in S355 ohne Materialaufdickung....	297
Tabelle 151: Spannung im Obergurt für $t_{OG}=25\text{mm}$ in S355 ohne Materialaufdickung....	297
Tabelle 152: Spannung im Obergurt für $t_{OG}=20\text{mm}$ in S355 ohne Materialaufdickung....	297
Tabelle 153: Spannung im Obergurt für $t_{OG}=15\text{mm}$ in S355 ohne Materialaufdickung....	297
Tabelle 154: Beulgefährdung für $s=12\text{mm}$ in S235, unversteift.....	298
Tabelle 155: Beulgefährdung für $s=10\text{mm}$ in S235, unversteift.....	298
Tabelle 156: Beulgefährdung für $s=8\text{mm}$ in S235, unversteift.....	299
Tabelle 157: Beulgefährdung für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quersteife	299
Tabelle 158: Beulgefährdung für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quersteife	300
Tabelle 159: Beulgefährdung für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife TF1	300
Tabelle 160: Beulgefährdung für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife TF1	301
Tabelle 161: Beulgefährdung für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife TF1/TF2..	301
Tabelle 162: Beulgefährdung für $s=12\text{mm}$ in S355, unversteift.....	302
Tabelle 163: Beulgefährdung für $s=10\text{mm}$ in S355, unversteift.....	302
Tabelle 164: Beulgefährdung für $s=8\text{mm}$ in S355, unversteift.....	303
Tabelle 165: Beulgefährdung für $s=12\text{mm}$ in S355, mit Quersteife	303
Tabelle 166: Beulgefährdung für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quersteife	303
Tabelle 167: Beulgefährdung für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quersteife	304
Tabelle 168: Beulgefährdung für $s=12\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1	304
Tabelle 169: Beulgefährdung für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1	304
Tabelle 170: Beulgefährdung für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1	305
Tabelle 171: Beulgefährdung für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1/TF2	305
Tabelle 172: Beulgefährdung für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1/TF2..	306
Tabelle 173: Beulgefährdung für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1/TF2/TF3	306
Tabelle 174: Lokale Verformung am Untergurt im Bereich $x=0\text{m}$ bis $x=5\text{m}$	307
Tabelle 175: Lokale Verformung am Untergurt im Bereich $x=5\text{m}$ bis $x=10\text{m}$	307
Tabelle 176: Lokale Verformung am Untergurt mit Aussteifung für $t_{UG}=20\text{mm}$ im Bereich $x=0\text{m}$ bis $x=5\text{m}$, Rippentyp 1 (Bl.20x200x400).....	307
Tabelle 177: Lokale Verformung am Untergurt mit Aussteifung für $t_{UG}=15\text{mm}$ im Bereich $x=0\text{m}$ bis $x=5\text{m}$, Rippentyp 1 (Bl.20x200x400).....	308
Tabelle 178: Lokale Verformung am Untergurt mit Aussteifung für $t_{UG}=15\text{mm}$ im Bereich $x=0\text{m}$ bis $x=5\text{m}$, Rippentyp 2 (Bl.20x200x600).....	308
Tabelle 179: Lokale Verformung am Untergurt mit Aussteifung für $t_{UG}=25\text{mm}$ im Bereich $x=5\text{m}$ bis $x=10\text{m}$, Rippentyp 1 (Bl.20x200x400)	308
Tabelle 180: Lokale Verformung am Untergurt mit Aussteifung für $t_{UG}=20\text{mm}$ im Bereich $x=5\text{m}$ bis $x=10\text{m}$, Rippentyp 1 (Bl.20x0200x400)	309

Tabelle 181: Lokale Verformung am Untergurt mit Aussteifung für $t_{UG}=15\text{mm}$ im Bereich $x=5\text{m}$ bis $x=10\text{m}$, Rippentyp 1 (Bl.20x200x400)	309
Tabelle 182: Lokale Verformung am Untergurt mit Aussteifungen für $t_{UG}=20\text{mm}$ im Bereich $x=5\text{m}$ bis $x=10\text{m}$, Rippentyp 2 (Bl.20x200x600)	309
Tabelle 183: Lokale Verformung am Untergurt mit Aussteifungen für $t_{UG}=15\text{mm}$ im Bereich $x=5\text{m}$ bis $x=10\text{m}$, Rippentyp 2 (Bl.20x200x600)	310
Tabelle 184: Aufstellung der Vorbauschnabelvarianten mit Basisangaben und Tafelgewicht	312
Tabelle 185: Aufstellung der Vorbauschnabelvarianten mit Basisangaben und Tafelgewicht - Fortsetzung 1	313
Tabelle 186: Aufstellung der Vorbauschnabelvarianten mit Basisangaben und Tafelgewicht - Fortsetzung 2	314
Tabelle 187: Aufstellung der Vorbauschnabelvarianten mit Basisangaben und Tafelgewicht - Fortsetzung 3	315
Tabelle 188: Aufstellung Konstruktionseigengewicht.....	316
Tabelle 189: Aufstellung Konstruktionseigengewicht - Fortsetzung 1	317
Tabelle 190: Aufstellung Konstruktionseigengewicht - Fortsetzung 2	318
Tabelle 191: Aufstellung Konstruktionseigengewicht - Fortsetzung 3	319
Tabelle 192: Aufstellung der Fertigungszeiten.....	320
Tabelle 193: Aufstellung der Fertigungszeiten - Fortsetzung 1	321
Tabelle 194: Aufstellung der Fertigungszeiten - Fortsetzung 2	322
Tabelle 195: Aufstellung der Fertigungszeiten - Fortsetzung 3	323
Tabelle 196: Aufstellung Kostenkalkulation	324
Tabelle 197: Aufstellung Kostenkalkulation - Fortsetzung 1	325
Tabelle 198: Aufstellung Kostenkalkulation - Fortsetzung 2	326
Tabelle 199: Aufstellung Kostenkalkulation - Fortsetzung 3	327

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Biegemomentenverlauf M_y in Abhängigkeit der Laststellung.....	77
Diagramm 2: Querkraftverlauf Q_z in Abhängigkeit der Laststellung	78
Diagramm 3: Normalkraftverlauf N_x in Abhängigkeit der Laststellung.....	78
Diagramm 4: Spannung im Obergurt für S235.....	98
Diagramm 5: Spannung im Obergurt in S355.....	98
Diagramm 6: Spannung im Obergurt für S235 ohne Aufdickung für Nachweisstelle 1	102
Diagramm 7: Spannung im Obergurt in S235 für Nachweisstelle 2	102
Diagramm 8: Bestimmung der Unterflanschbiegung nach SAHMEL [14].....	107
Diagramm 9: Beulverhalten für $s=12\text{mm}$ in S235, unverteift	119
Diagramm 10: Beulverhalten für $s=10\text{mm}$ in S235, unverteift	121
Diagramm 11: Beulverhalten für $s=8\text{mm}$ in S235, unverteift	121
Diagramm 12: Beulverhalten für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quersteife	122
Diagramm 13: Beulverhalten für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife TF1.....	123
Diagramm 14: Beulverhalten für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife TF1/TF2 ..	123
Diagramm 15: Beulverhalten für $s=12\text{mm}$ in S355, unverteift	124
Diagramm 16: Beulverhalten für $s=10\text{mm}$ in S355, unverteift	124
Diagramm 17: Beulverhalten für $s=8\text{mm}$ in S355, unverteift	125
Diagramm 18: Beulverhalten für $s=12\text{mm}$ in S235, mit Quersteife	125
Diagramm 19: Beulverhalten für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quersteife	126
Diagramm 20: Beulverhalten für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quersteife	126
Diagramm 21: Beulverhalten für $s=12\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1.....	127
Diagramm 22: Beulverhalten für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1.....	127
Diagramm 23: Beulverhalten $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife	127
Diagramm 24: Beulverhalten für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1/TF2	128
Diagramm 25: Beulverhalten für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1/TF2 ..	128
Diagramm 26: Beulverhalten $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1/TF2/TF3	129
Diagramm 27: Ergebnisse interpolierter INW für $s=15\text{mm}$ in S235, unverteift.....	139
Diagramm 28: Ergebnisse interpolierter INW für $s=12\text{mm}$ in S235, unverteift.....	139
Diagramm 29: Ergebnisse interpolierter INW für $s=10\text{mm}$ in S235, unverteift.....	140
Diagramm 30: Ergebnisse interpolierter INW für $s=8\text{mm}$ in S235, unverteift.....	140
Diagramm 31: Ergebnisse interpolierter INW für $s=12\text{mm}$ in S355, unverteift.....	141
Diagramm 32: Ergebnisse interpolierter INW für $s=10\text{mm}$ in S355, unverteift.....	141
Diagramm 33: Ergebnisse interpolierter INW für $s=8\text{mm}$ in S355, unausgesteift	142
Diagramm 34: Ergebnisse interpolierter INW für $s=12\text{mm}$ in S235, mit Quersteife	142
Diagramm 35: Ergebnisse interpolierter INW für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quersteife	143
Diagramm 36: Ergebnisse interpolierter INW für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quersteife	143
Diagramm 37: Ergebnisse interpolierter INW für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quersteife	144

Diagramm 38: Ergebnisse interpolierter INW für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quersteife	144
Diagramm 39: Ergebnisse interpolierter INW für $s=12\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife.....	145
Diagramm 40: Ergebnisse interpolierter INW für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife.....	145
Diagramm 41: Ergebnisse interpolierter INW für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife.....	146
Diagramm 42: Ergebnisse interpolierter INW für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife.....	146
Diagramm 43: Ergebnisse interpolierter INW für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife.....	147
Diagramm 44: Lokale Verformung im Untergurt ohne zusätzliche Aussteifungen	158
Diagramm 45: Verformung UG im Bereich $x=0\text{m}$ bis $x=5\text{m}$ mit zusätzlichen Rippen	159
Diagramm 46: Verformung UG im Bereich $x=5\text{m}$ und $x=10\text{m}$ mit zusätzlichen Rippen...	160
Diagramm 47: Bauteilgewicht und Materialkosten für $s=22\text{mm}$ in S235	178
Diagramm 48: Bauteilgewicht und Materialkosten für $s=15\text{mm}$ in S235	178
Diagramm 49: Bauteilgewicht und Materialkosten für $s=12\text{mm}$ in S235	179
Diagramm 50: Bauteilgewicht und Materialkosten für $s=10\text{mm}$ in S235	179
Diagramm 51: Bauteilgewicht und Materialkosten für $s=8\text{mm}$ in S235	179
Diagramm 52: Bauteilgewicht und Materialkosten für $s=15\text{mm}$ in S355	180
Diagramm 53: Bauteilgewicht und Materialkosten für $s=12\text{mm}$ in S355	180
Diagramm 54: Bauteilgewicht und Materialkosten für $s=10\text{mm}$ in S355	180
Diagramm 55: Bauteilgewicht und Materialkosten für $s=8\text{mm}$ in S355	180
Diagramm 56: Fertigungszeiten und Fertigungskosten für $s=22\text{mm}$ in S235	187
Diagramm 57: Fertigungszeiten und Fertigungskosten für $s=15\text{mm}$ in S235	187
Diagramm 58: Fertigungszeiten und Fertigungskosten für $s=12\text{mm}$ in S235	188
Diagramm 59: Fertigungszeiten und Fertigungskosten für $s=10\text{mm}$ in S235	188
Diagramm 60: Fertigungszeiten und Fertigungskosten für $s=8\text{mm}$ in S235	188
Diagramm 61: Fertigungszeiten und Fertigungskosten für $s=15\text{mm}$ in S355	189
Diagramm 62: Fertigungszeiten und Fertigungskosten für $s=12\text{mm}$ in S355	189
Diagramm 63: Fertigungszeiten und Fertigungskosten für $s=10\text{mm}$ in S355	189
Diagramm 64: Fertigungszeiten und Fertigungskosten für $s=8\text{mm}$ in S355	189
Diagramm 65: Gesamtkostenzusammenfassung für S235	190
Diagramm 66: Gesamtkostenzusammenfassung für S355	191
Diagramm 67: Anteil des Bauteilgewichtes ausgewählter Vorbauschnabelvarianten.....	196
Diagramm 68: Anteil der Fertigungszeiten ausgewählter Vorbauschnabelvarianten.....	198
Diagramm 69: Vergleich FE-Berechnung mit analytischer Berechnung am Beispiel der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für S235	201

Diagramm 70: Vergleich FEM zu analytischer Berechnung am Beispiel der Schubspannung im Stegblech für S235	202
Diagramm 71: Vergleich FEM zu analytischer Berechnung am Beispiel der Spannungen im Obergurt ohne Aufdickungsblech für S355	202
Diagramm 72: Vergleich FEM-Ergebnis mit analytischem Ergebnis anhand der lokalen Verformung des Untergurts an der Stelle $x=7,5\text{m}$	207

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

BK	- Biegeknicken
BDK	- Biegedrillknicken
EG	- Eigengewicht
EÜ	- Eisenbahnüberführung
FEM	- Finite Elemente Methode
FLP	- Flächenprüfung (Ultraschall)
GF	- Gesamtfeld
GW	- Grundwerkstoff
GZG	- Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
GZT	- Grenzzustand der Tragfähigkeit
INW	- Interaktionsnachweis
LG	- Lastgruppe
LF	- Lastfall
LK	- Lastkombination
LS	- Laststellung
MAG	- Metall Aktivgas Schweißen
OG	- Obergurt
PTFE	- Polytetrafluorethylen (Handelsname Teflon)
RZP	- Randzonenprüfung (Ultraschall)
SLV	- Scher-Lochleibungs-Verbindung (planmäßig vorgespannt)
SLVP	- Scher-Lochleibungs-Passverbindung (planmäßig vorgespannt)
TF	- Teilfeld
UG	- Untergurt
VL	- Verschlager
VBS	- Vorbauschnabel
VT	- Versteifungsträger (bezogen auf Brückenquerschnitt)

Einwirkungsgrößen

D	- Drucknormalkraft
F	- Kraft
g	- Eigengewicht
N	- Normalkraft
Q	- Querkraft
q	- Flächenbelastung
Z	- Zugnormalkraft

Bauteilgeometrie

a	- Nahtdicke
b	- Breite
d_L	- Lochdurchmesser
e	- Außermittigkeit
h	- Trägerhöhe
h_{Steg}	- Steghöhe
s	- Stegdicke
t	- Gurt Dicke

Bauteilwiderstände

A_{gurt}	- Gurtfläche
A_{steg}	- Stegfläche
E	- Elastizitätsmodul
$f_{y,k}$	- Streckgrenze
G	- Schubmodul
I_y	- Flächenträgheitsmoment 2. Grades um y-Achse
I_z	- Flächenträgheitsmoment 2. Grades um z-Achse
I_t	- Torsionsflächenmoment 2. Grades
I_ω	- Wölbflächenmoment 2. Grades
$M_{\text{pl},y,d}$	- Biegemoment im plastischen Zustand um y-Achse
$M_{\text{pl},z,d}$	- Biegemoment im plastischen Zustand um z-Achse
M_y	- Biegemoment um y-Achse
M_z	- Biegemoment um z-Achse
N_{ki}	- Normalkraft unter der kleinsten Verzweigungslast
$N_{\text{pl},d}$	- Normalkraft im plastischen Zustand
S_y	- Flächenmoment 1. Grades um y-Achse
S_z	- Flächenmoment 1. Grades um z-Achse
W_y	- Widerstandsmoment bezogen auf y-Achse
W_z	- Widerstandsmoment bezogen auf z-Achse

Allgemeine Bezeichnungen

$el-el$	- elastisch – elastisch
f	- Verformung
l	- Stützweite; Stablänge
S	- Schwerpunkt
s_k	- Knicklänge
u	- Verformung

Griechische Buchstaben

α	- Faktor, Winkel
β	- Faktor, Knicklängenbeiwert
γ_f	- Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkung
γ_m	- Teilsicherheitsbeiwert für die Widerstandsgröße
κ	- Abminderungsfaktor
λ	- Schlankheit
μ	- Reibzahl
η_{Ki}	- Verzweigungslastfaktor
σ	- Spannung (Normalspannung)
τ	- Spannung (Schubspannung)
φ_0	- Winkel der Schiefstellung
ψ	- Spannungsverhältnis

Nebenzeichen

Index d	- Bemessungswert
Index k	- charakteristischer Wert
Index R,d	- Beanspruchbarkeit
Index w	- Schweißen
Index x	- x-Achse (Stablängsachse)
Index y	- y-Achse (Hauptachse)
Index z	- z-Achse (Hauptachse)

1 Allgemeines

1.1 Ziel der Diplomarbeit

Ziel der Diplomarbeit ist es, zunächst einen Überblick über die Montagemöglichkeiten im Brückenbau, speziell mit Hilfe von Vershubsystemen, zu geben. Weiterführend dazu soll am Beispiel der Eisenbahnüberführung Stör eine Variantenuntersuchung ausgewählter stählerner Vorbauschabelkonstruktionen erarbeitet werden. Dazu wird ein Montagekonzept für den geplanten Vershub erarbeitet, welches die Basis für die Untersuchung bildet. Im Folgenden werden die Varianten unter statischen Gesichtspunkten untersucht und daraus entstehende konstruktive Maßnahmen abgeleitet. Die Nachweisführung erfolgt dabei nach analytischer Berechnung sowie nach der Finiten Elemente Methode. Zur Gegenüberstellung der Varianten wird eine Kalkulation hinsichtlich Material- und Fertigungskosten erstellt. Somit kann eine Aussage getroffen werden, welche Variante aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten am günstigsten für das vorliegende Projekt der EÜ Stör geeignet ist. Zudem soll abschließend eine Gegenüberstellung zwischen den beiden Berechnungsverfahren erfolgen.

1.2 Abgrenzungskriterien

Für die vorhandenen Montagemöglichkeiten von Brückenbauwerken wird ein Überblick erarbeitet, wobei speziell auf Vershubsysteme eingegangen wird. Anderweitige Konzepte, wie beispielsweise Kranmontagen, werden dabei nicht vorgestellt und erläutert.

Hinsichtlich der zu untersuchenden Vorbauschabelkonstruktionen wird sich auf Vollwandstrukturen beschränkt. Die Abmessung und Dimensionierung der Strukturen ist dabei Bestandteil der Variantenuntersuchung. Hinsichtlich der zu verwendenden Materialien sollen Stähle der Festigkeit S235 und S355 die Auswahl begrenzen. Auf die Verwendung unterschiedlicher Materialfestigkeiten der Haupttragelemente (Hybride-Querschnitte) wird nicht eingegangen.

Die Eisenbahnüberführung Stör wird als einfeldrige, eingleisige Stabbogenbrücke ausgeführt. Die Montage erfolgt mittels Vershub unter Verwendung eines stählernen Vorbauschabels. Lösungen für eventuelle erforderliche Hilfskonstruktionen zur Stabilisierung der Brücke für den Zeitraum der Montage ist dabei nicht Bestandteil der Arbeit. Weiterhin wird für den Vershubvorgang der EÜ Stör ein definiertes Vershubkonzept zu Beginn der Arbeit festgelegt, auf dessen Basis alle Untersuchungen aufbauen. Auf alternative Vershubmöglichkeiten und deren Auswirkungen wird nicht weiter eingegangen.

Die statische Nachweisführung erfolgt nach der Normenreihe DIN 18800 sowie den entsprechenden normativen Verweisungen. Auf die Normenreihe Eurocode 3, beziehungsweise den darauf basierenden DIN Fachbericht 103 wird nicht eingegangen.

Die Berechnung nach FE-Methode bezieht sich nur auf die zu erbringenden Nachweise des Hauptträgers. Der Nachweis der Verbände und der Anschlussstatik erfolgt ausschließlich mittels analytischer Berechnung.

Zum Zweck der Erstellung der Kalkulation hinsichtlich Materialverbrauch und Fertigungszeiten der einzelnen Baugruppen wird der Vorbauschnabel exemplarisch für eine Variante modelliert und entsprechende Übersichtszeichnungen einzelner Positionen erstellt. Die detaillierte Erstellung von Konstruktions- und Fertigungszeichnungen wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht durchgeführt. Grundlage für die Konstruktion ist das Ergebnis der FEM Berechnung.

2 Systematik von Vershubsystemen im Brückenbau

2.1 Allgemeine Anforderungen an Vershubsysteme im Brückenbau

Die Errichtung von Brückenbauwerken stellt Ingenieure und Architekten vor immer neue Herausforderungen. Dabei sind neben optischen und statischen Gesichtspunkten auch die Montagemöglichkeiten und Bedingungen vor Ort zu berücksichtigen. Lösungsansätze für Montagesysteme sind dabei von den geometrischen und geografischen Randbedingungen im Dialog mit den Bedingungen der Gründung und der Möglichkeit zum Einsatz von Hilfsgerüsten abhängig.

Gerade Ersatzneubauten für bestehende Brücken verlangen oft nach kurzen Montagezeiten, um den bestehenden Straßen- oder Eisenbahnverkehr nur kurzfristig zu sperren. Besonders im Schienenverkehr sind meist sehr eng bemessene Zeiträume zum Austausch bestehender Überbauten festgelegt. Entstehende Zeitverzögerungen würden dann nicht nur den Personen- und Güterverkehr erheblich beeinträchtigen, sondern auch hohe Vertragsstrafen für die Montagefirmen nach sich ziehen. Durch diese Gegebenheiten ist es meist nicht möglich die Bauwerke am späteren Bestimmungsort schrittweise zu montieren. Eine Vormontage der Überbauten an einem gesonderten Vormontageplatz ergibt sich damit zwangsläufig. Um die Brücke jedoch an ihren Bestimmungsort zu befördern, stehen neben Kran- und Hubmontagekonzepten auch diverse Vershubsysteme zur Auswahl. Diese sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Die Systeme sind im Wesentlichen Eigenentwicklungen der Marktteilnehmer, es stehen aber auch Systeme externer Dienstleister zur Verfügung. Da die Erfahrungen der Montagefirmen mit diesen Systemen sehr unterschiedlich sind, ist eine direkte Gegenüberstellung und Wertung hinsichtlich ihrer Nutzung recht schwierig.

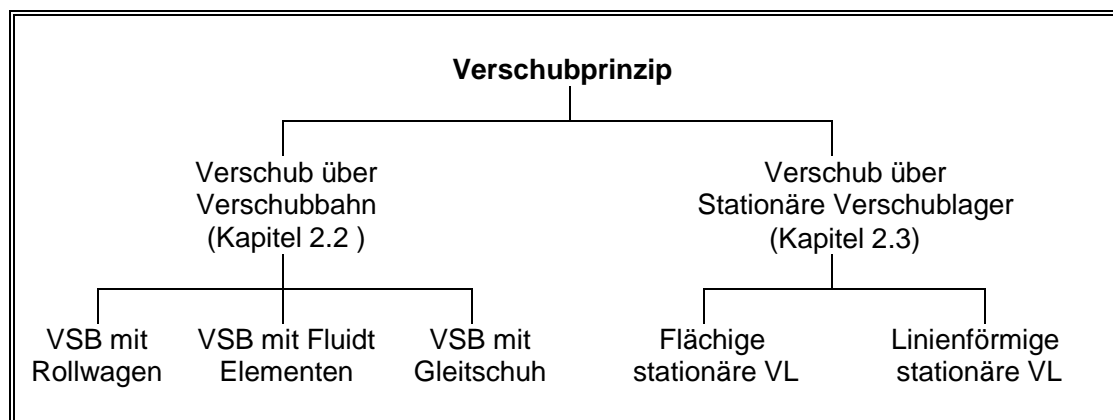


Abbildung 1: Schema Vershubprinzip

Aus den Beanspruchungen, die der Verschiebungsvorgang erzeugt, ergeben sich bemessungsrelevante Vorgaben für den Überbau. Wo der Überbau nicht in der Lage ist, ohne lokale oder globale Verstärkungen die Beanspruchung aufzunehmen, werden Hilfskonstruktionen temporär in den Überbau integriert oder von vorn herein entsprechende Materialaufdickungen beziehungsweise Aussteifungen vorgesehen.

2.2 Verschiebprinzip unter Anwendung von Verschiebbahnen

Eine der Möglichkeiten zur Realisierung von Brückenverschieben ist die Verwendung einer Verschiebbahn. Diese besteht aus einem oder mehreren Stahlprofilen, meist als I-, H- oder Kastenprofil ausgeführt, über das die Brückenkonstruktion geführt werden kann (Abbildung 2). Dabei ruht der Überbau auf Rollwagen, Luftkissen (FLUIDTS®/APS) oder Gleitschuhen, die über die Verschiebbahnen gleiten. Dadurch kann ein reibungsarmer Verschiebung gewährleistet werden. Bei diesem Verfahren muss jedoch berücksichtigt werden, dass zum einen die Brücke aufgestapelt oder hydraulisch angehoben werden muss, um die Rollwagen, Luftkissen oder Gleitschuhe unter dem Überbau zu positionieren und zum anderen muss nach erfolgreichem Verschiebung dieser Vorgang in umgekehrter Reihenfolge wieder ausgeführt werden. Die Brücke wird demzufolge meist deutlich oberhalb der späteren Auflagerebene verschoben.

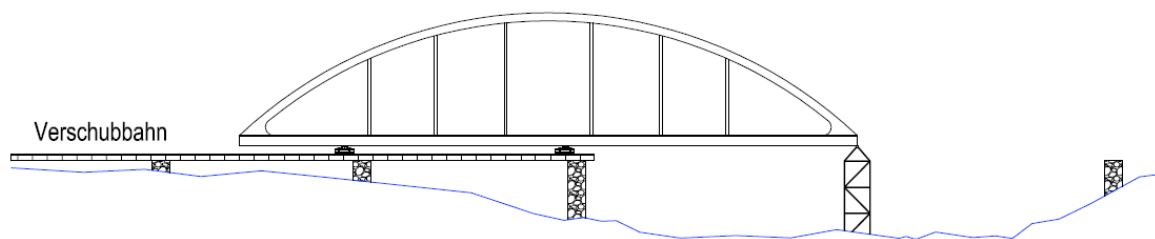


Abbildung 2: Verschiebprinzip unter Anwendung einer Verschiebbahn

• Verschiebbahnen mit Rollwagen – System SEH

Für den Verschiebung mittels Verschiebbahn und Rollwagen wird speziell auf das System der Firma SEH (Stahlbau Engineering Hannover GmbH) eingegangen. Das Verschiebungssystem SEH besteht aus speziell gefertigten Verschiebungsträgern und Rollwagen (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4), die auf Basis einer Normstatik universell einsetzbar sind. Die Verschiebungsträger bestehen generell aus zwei HEB-Profilen mit einer Schiene auf dem Obergurt. Zur Abtragung horizontaler Lasten sind die beiden Profile über U-Profile und einer Fachwerkstruktur aus Winkelprofilen miteinander gekoppelt. Die Krafteinleitung des Überbaus

erfolgt über einen Auflagerträger in eine Wagenkonstruktion bestehend aus 4 Rädern, von denen jeweils 2 hintereinander in einer Führungsschiene auf den Vershubträger laufen (Abbildung 4). Um auf besondere Belange verschiedener Baustellen einzugehen, stehen Querschnittshöhen der Vershubbahnenträger von 400mm, 550mm, 800mm, 900mm und 1000mm zur Verfügung. Die Längen variieren dabei von 2250mm bis hin zu 19400mm. Die Verbindung untereinander erfolgt über Stirnplattenstöße, bei unterschiedlichen Querschnittshöhen werden entsprechende Anschlüsse montiert. Für die Rollwagen selbst stehen zwei Ausführungen mit einer Tragkraft von 100t und 250t je Wagenkonstruktion zur Verfügung.

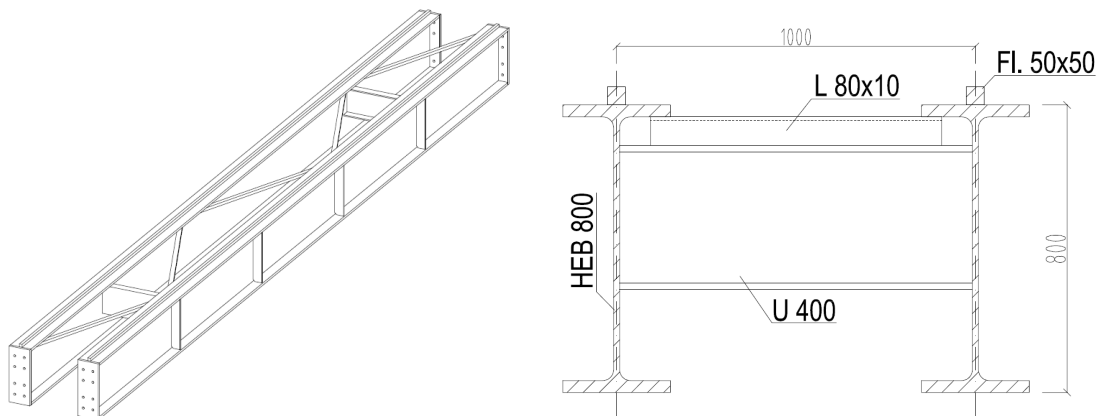


Abbildung 3: Beispiel SEH - Vershubbahn

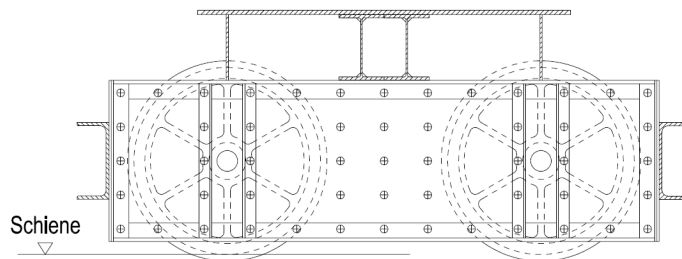


Abbildung 4: Rollwagenkonstruktion SEH

• Vershubbahnen mit FLUIDTS® oder APS

Fluidts® ist ein Produkt der Firma Noell Service und Maschinentechnik GmbH, APS (Air-Pad-Sliding-System) ein Produkt der Firma Hebetec. Beide Systeme arbeiten nach demselben Grundprinzip. Dieses System ist grundsätzlich mit dem Vorgegangenen im Hinblick auf den Montageablauf der Brückenkonstruktion zu vergleichen. Der Unterschied besteht hierbei aber in der Art der Bewegung.

Als Vershubbahn kommt eine Stahlplatte mit entsprechender Unterkonstruktion zum Einsatz. Je nach Beschaffenheit des Untergrundes beziehungsweise der Unterkonstruktion

kann zwischen einer schweren und einer leichten Vershubbahn gewählt werden (Abbildung 5). Bei sehr planem Untergrund können auch einfache Stahlbleche ohne seitliche Führung zum Einsatz kommen.

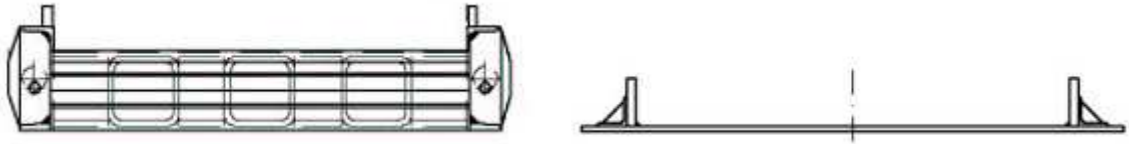


Abbildung 5: Schwere und leichte Ausführung einer Vershubgleitbahn

Auf diesen Vershubbahnen befindet sich das eigentliche Transportsystem, welches auf der Luftgleittechnik basiert. Die Tragplatten sind tellerförmig aufgebaut und durch die hinzugefügte Druckluft bildet sich ein Luftpolster zwischen Gleitbahn und Tragplatte, wodurch diese mit dem Überbau in den Schwebezustand versetzt wird (Abbildung 6). Um ein Entweichen der Luft zu verhindern, befinden sich armierte Gummidichtungen am äußeren Rand der Tragplatten. Der Reibungswiderstand dieses Systems ist mit 1% äußerst gering. Eine vertikale Last von 1000 kN kann demzufolge schon mit 10 kN Horizontalkraft in Bewegung versetzt werden. Zusätzlich befinden sich hydraulische Pressen auf den Tragplatten, wodurch die Brückenkonstruktion problemlos gehoben und abgesenkt werden kann.

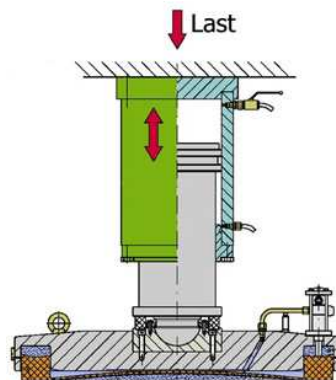


Abbildung 6: Querschnitt APS-System

Beachtet werden muss jedoch, dass die Gleitplatten entweder plan am Boden aufliegen oder beim Positionieren auf Stützen durch eine weitere Unterkonstruktion stabilisiert werden.

Die Tragkraft eines einzelnen Fluidts[®] ist mit maximal 250t angegeben. Beim APS-System steht eine 250t und eine 385t Variante zur Auswahl. Im Verbund mit weiteren Fluidtelementen kann die Tragkraft auf bis zu 10.000 Tonnen gesteigert werden. Der Vorteil dieses Systems liegt darin, dass es nicht zwingend an eine Vershubbahn gebunden ist. Dadurch kann es schon beim Transport des Überbaus vom Vormontageplatz zum Vershubstandort eingesetzt werden. Abbildung 7 zeigt den Einsatz der Luftgleittechnik beim Vershub einer Brücke.

Eine entsprechende Vorschubanlage, welche in Kombination mit dem APS-System verwendet werden kann, wird im Kapitel 2.4 näher vorgestellt.



Abbildung 7: Einsatz FLUIDTS®-System im Brückenbau

• Verschubbahn mit Gleitschuh

Ein drittes Vershubkonzept mittels Verschubbahn ist von der Firma Mammoet erhältlich. Dabei bewegt sich auf der Bahn ein Gleitschuh, welcher mit oder ohne hydraulischer Hubvorrichtung ausgerüstet sein kann (Abbildung 8). Die Länge dieses Gleitschuhs beläuft sich bei der schwersten Variante auf immerhin 4500mm bei einer Höhe von 1500mm. Die Hydraulik ist mit einem Hubweg von 600mm ausgestattet und kann dabei bis zu 500t schwere Lasten bewegen. Zudem ist dieses System in zwei kleineren Varianten erhältlich, jedoch ohne hydraulische Hubvorrichtung.

Die Verschubbahn selbst besteht aus verschweißten Blechen (Abbildung 8). Auf dem Fahrbahnblech befinden sich teflonbeschichtete Platten, die einen reibungsarmen Vershub der Gleitschuhe ermöglicht. An der Außenseite sind zudem in Abständen von je 1000mm Eckbleche verschweißt. Diese haben die Aufgabe, die eigens dafür erhältliche Vorschubanlage zu arretieren. Weiteres dazu kann dem Kapitel 2.4 entnommen werden.

Bei Anwendung der Verschubbahn muss eine geeignete Unterkonstruktion montiert werden, da die Gleitbahn selbst nur eine minimale Steifigkeit besitzt und somit den hohen Belastungen nicht standhalten würde. Als Unterkonstruktion eignen sich beispielsweise Kastenprofile, H-Profile oder doppelte U-Profile. Die Länge der einzelnen Verschubbahnsegmente beläuft sich in der schweren Ausführung auf 5760mm und in der leichten Ausführung auf 2000mm. Über die an den Enden befindlichen Laschen können die Bahnen in ihrer Länge unbegrenzt miteinander verbunden werden.

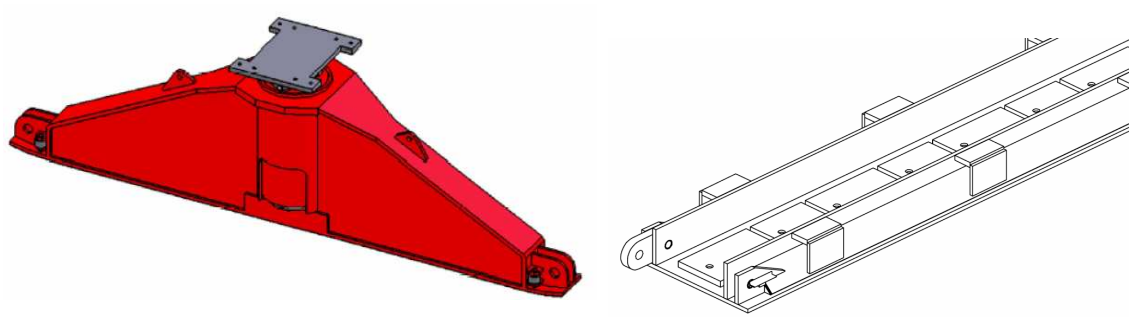


Abbildung 8: Gleitschuh Mammoet mit Hubhydraulik (links) und Verschubbahn (rechts)

2.3 Stationäre Vershubsysteme

Stationäre Systeme sind solche, die selbst keine Bewegung im Sinne des Vorschubes ausführen, stattdessen gleitet der Überbau über feststehende Vershublager. Dabei ist jedoch entscheidend, wie die Auflagerreaktion in den Steg der Brückenkonstruktion eingeleitet wird. Daher wird zwischen flächenförmigen und linienförmigen Vershublagern differenziert.

Um ein Gleiten des Überbaus über die Vershublager zu ermöglichen, müssen diese mit entsprechenden Gleitwerkstoffen versehen sein. Die Gleitpaarung aus Edelstahl und PTFE ist dafür geeignet, aber auch eine Beschichtung aus Zinkphosphat unterhalb des Überbaus in Verbindung mit PTFE kommt zur Anwendung. Weiteres dazu ist im Kapitel 2.9 beschrieben.

Weiterhin werden üblicherweise unterhalb der Vershublager eine oder mehrere hydraulische Pressen installiert. Bei Einsatz mehrerer Pressen könne diese hydraulisch miteinander gekoppelt werden, sodass bei allen der gleiche Druck anliegt. Mit Hilfe dieser Pressen kann die Auflagerhöhe exakt an den jeweiligen Montageschritt angepasst werden. Zudem wird eine gleichmäßige Lastverteilung in den Überbau gewährleistet.

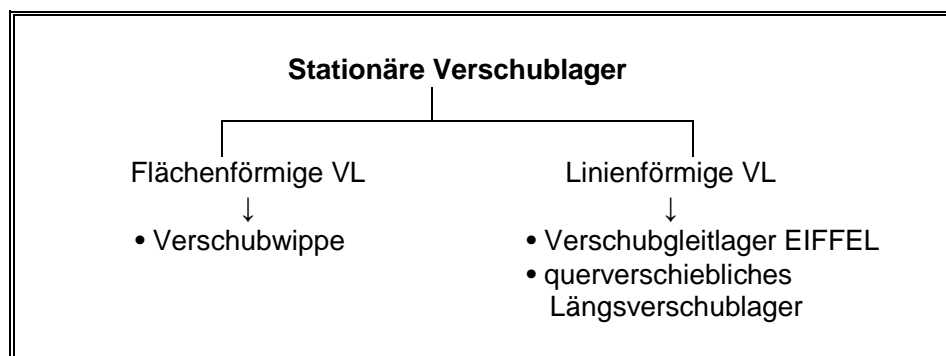


Abbildung 9: Schema stationäre Vershublager

• Flächenförmiges Vershublager

Hierbei handelt es sich um Vershublager, welche mit einer entsprechend breiten Gleitlagerfläche versehen sind. Dadurch wird trotz seitlich auftretender Abweichungen während des Vorschubs die Auflagerreaktion zentrisch in den Brückensteg eingeleitet. Örtliche Spannungserhöhungen infolge Exzentrizität können somit ausgeschlossen werden.

Ein spezielles System für ein stationäres flächiges Vershublager bildet die Vershubwippe. Dieses kommt hauptsächlich bei Großbrückenprojekten mit großen Spannweiten und Mehrfeldsystemen zum Einsatz. Erfolgt die Montage der Brücke mittels Längsvorschub, so kommt es durch den sich bildenden Kragarm während des Vorschubs zu Verformungen. Diese Verformungen sind jedoch nicht nur am Kragarm selbst, sondern auch an den Aufla-

gerpunkten spürbar. Aufgabe dieser Wippe ist es, diese auftretenden Drehwinkel- und Krümmungsänderungen aufzunehmen und Lagerreaktionen in den Brückensteg einzuleiten.

Im Aufbau besteht die Vershubwippe (Abbildung 10) aus einem Stahlprofil, welches sich unter der Brückenkonstruktion befindet und mittig auf einer Kippleiste punktförmig gelagert wird. An der Oberseite der Wippe ist zudem ein PTFE-Lager mit darunter liegender Elastomerschicht angebracht, um die Brücke möglichst reibungsarm darüber verschieben zu können. Die Dicke der Elastomerschicht muss der Steifigkeit des Stahlprofils angepasst werden, um somit eine möglichst gleichmäßige Querdruckspannung über die Länge des Profils in den Überbau zu gewährleisten.

Dieses System wurde unter anderem erfolgreich bei der Montage der 432m langen Talbrücke Elben eingesetzt und hat somit deren Funktionalität unter Beweis gestellt.

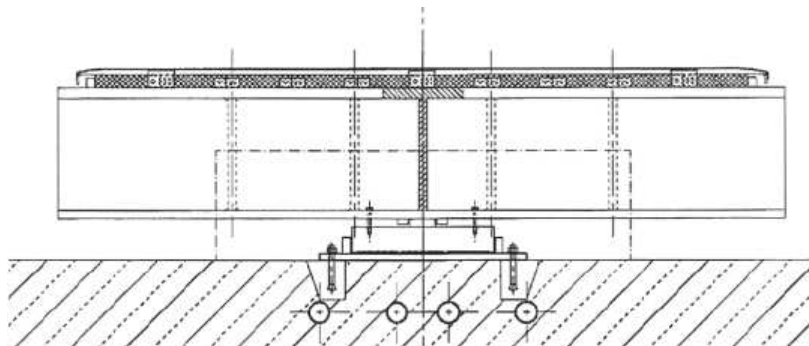


Abbildung 10: Aufbau Vershubwippe Fa. Donges Stahlbau



Abbildung 11: Einsatz Vershubwippe beim Bau der Talbrücke Elben

• Linienförmige Vershublager

Im Gegensatz zum flächigen Vershublager ist bei den linienförmigen Vershublagern die Auflagerbreite geringer. Abbildung 12 zeigt ein Vershubgleitlager der Firma EIFFEL, wel-

ches unter anderem bei der Montage der Elbebrücke bei Hämerten zur Anwendung kam. Im Aufbau besteht dies im Wesentlichen aus einer hydraulischen Presse mit dem darüber liegenden Verschlusslager, bestehend aus einem massiven Stahlblock mit eingebetteten, gekammerten Teflonscheiben. Zwischen Presse und Verschlusslager befindet sich zudem ein Kalottenlager, sodass die auftretenden Drehwinkelverformungen im Auflagerbereich ausgeglichen werden können. Der Überbau muss jedoch über Wälzswagen seitlich exakt geführt werden, anderenfalls wird die Auflagerreaktion exzentrisch in den Brückensteg infolge der Außermittigkeit zwischen Stegachse und Pressenachse eingeleitet. Dies führt zu örtlichen Spannungserhöhungen und zusätzlichen Verformungen im Überbau. Große Exzentrizitäten sind außerdem zu vermeiden, um die Pressung im Elastomer nicht zu groß werden zu lassen, da ansonsten der Überbau auf dem Stahlblock auflaufen kann.



Abbildung 12: Verschlussgleitlager EIFFEL

Um die Montage von Brücken mit Radien beziehungsweise Klotheide durchführen zu können, kommen querverschiebbliche Längsverschlusslager als spezielles stationäres Verschlussversystem zum Einsatz (siehe Abbildung 13 bis Abbildung 15). Diese bestehen aus Längs- und Querverschlusslagern. Das Längsverschlusslager hat dabei die Aufgabe, den Überbau vertikal zu stützen. Eine seitliche Führung sorgt für die horizontale Absicherung. Die Besonderheit liegt jedoch darin, dass die Seitenführung nicht starr, sondern über Querverschlusslager dem Verlauf des Brückenradius angepasst werden kann. Durch stetiges querverschieben wird somit der korrekte Verlauf der Klotheide gewährleistet.

Die Konstruktionsweise eines solchen querverschiebblichen Längsverschlusslagers kann wie folgt beschrieben werden. In Vorschubrichtung sind beidseitig unterhalb der Brückenhauptträger mehrere Längsverschlusslager, welche sich auf Hydraulikpressen befinden, miteinander gekoppelt. Dabei ist eine Achse als Festpunkt ausgebildet, alle weiteren sind querverschieblich gelagert. Mit Hilfe eines Litzenhebers oder eines anderen hydraulischen Systems kann demzufolge die bewegliche Achse in Querrichtung verschoben werden. Somit wird der Überbau entsprechend der Querbewegung geführt.

2. Systematik von Verschubsystemen im Brückenbau

Dieses System wurde von der Firma EIFFEL erfolgreich beim Bau der 845m langen Haseltalbrücke bei Suhl eingesetzt und hat somit deren Funktionalität eindrucksvoll unter Beweis gestellt.

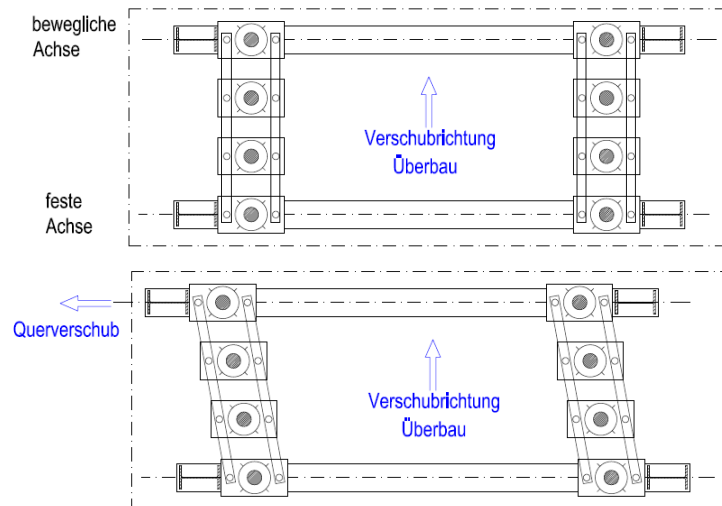


Abbildung 13: Grundprinzip des querverschieblichen Längsverschublagers

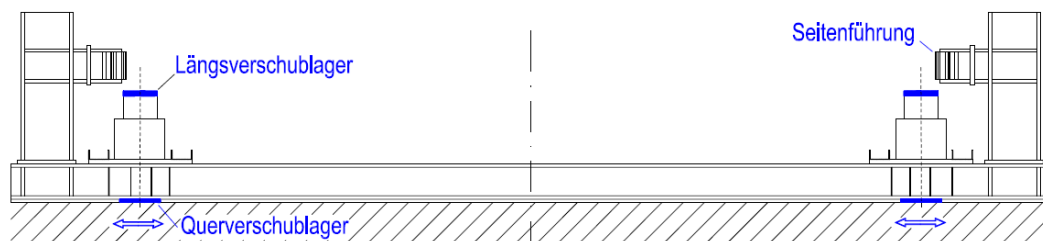


Abbildung 14: Querschnitt des querverschieblichen Längsverschublagers



Abbildung 15: Verschubstation beim Bau der Haseltalbrücke bei Suhl

2.4 Vorschubsysteme im Brückenbau

Neben den diversen Möglichkeiten zur Auswahl des geeigneten Vershubsystems stehen auch für die Vorschubsysteme mehrere Varianten zur Auswahl. In Abbildung 16 sind die unterschiedlichen Möglichkeiten aufgezeigt.

Aufgabe der Vorschubsysteme ist das Bewegen der Brückenkonstruktion über die Verschubeinrichtungen. Für einige Vershubsysteme, wie beispielsweise APS oder Mommoet Gleitschuhe stehen speziell dafür entwickelte Vorschubanlagen zur Verfügung.

Andere Systeme hingegen, zum Beispiel das Enerpac-System sind speziell für ein konkretes Großbrückenprojekt entwickelt worden, um den dort gestellten Anforderungen gerecht zu werden. Die in Abbildung 16 aufgelisteten Systeme werden in den nachfolgenden Kapiteln detailliert beschrieben.

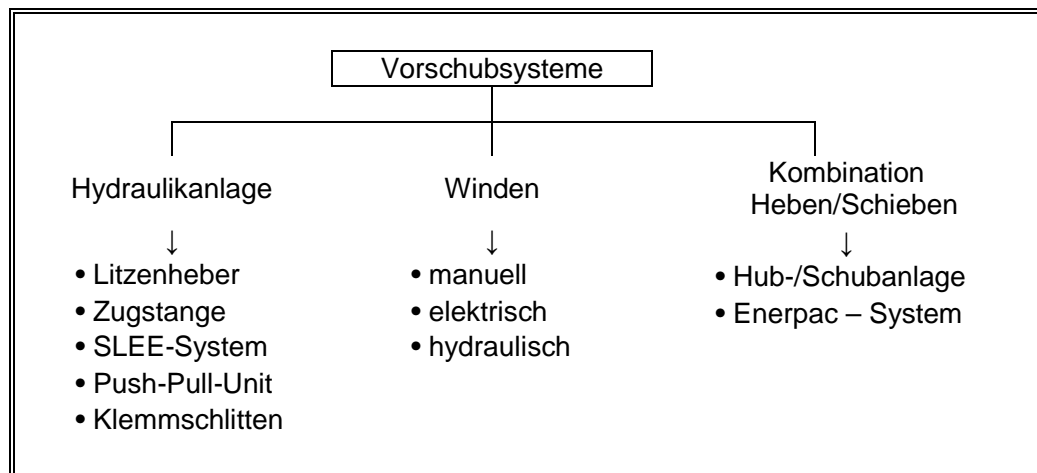


Abbildung 16: Gliederung Vorschubsysteme

• Vorschub mittels Litzenheber

Die Realisierung des Vorschubs mit Hilfe des Litzenhebers ist ein häufig angewendetes Prinzip. Der Vorteil ist, dass pro Litzenheber bis zu 6000kN gehoben oder verschoben werden können. Damit ist es möglich, selbst größte Bauwerke zu bewegen. Weiterhin vorteilhaft ist die nahezu unbegrenzte Seillänge, was es ermöglicht, das System in vielfältiger Art und Weise anzuwenden.

Das Funktionsprinzip des Litzenhebers ist dabei relativ einfach. Dieser besteht im Wesentlichen aus zwei Klemmen und einer Hydraulik, die den eigentlichen Hub ermöglicht. In Abbildung 17 ist der Vorgang grafisch dargestellt.

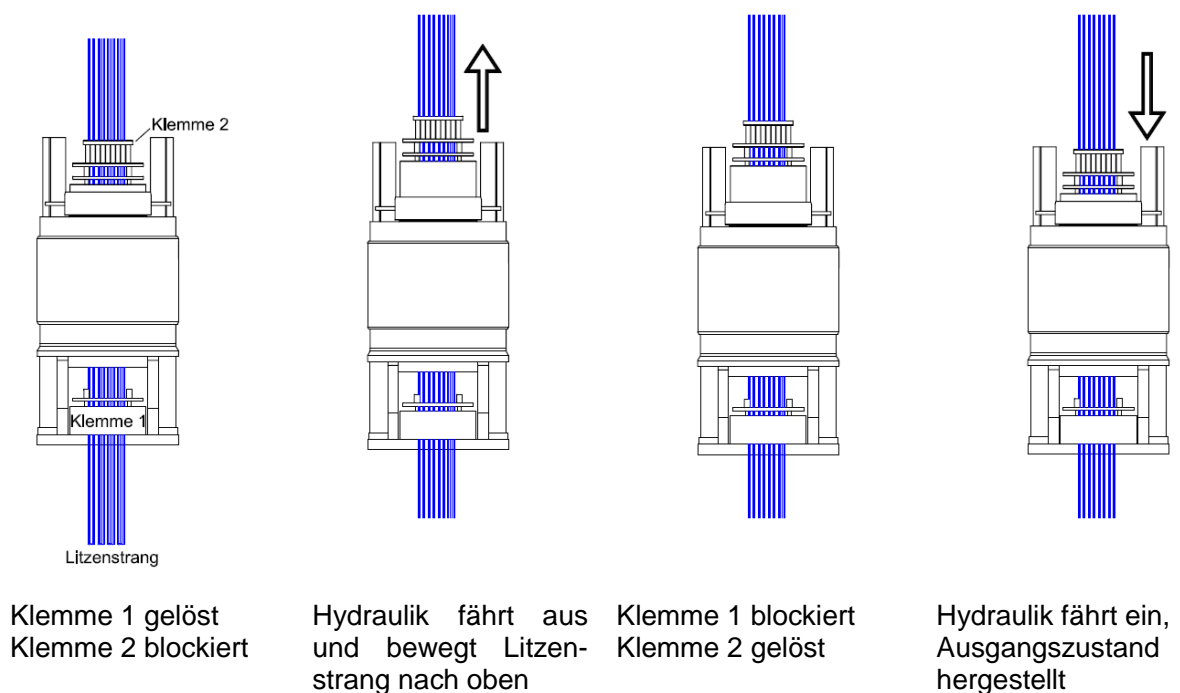


Abbildung 17: Funktionsprinzip Litzenheber

Um den Litzenheber zum Vorschub einer Brückenkonstruktion zu nutzen, muss dieser in horizontaler Lage eingesetzt werden. Dieser befindet sich dann beispielsweise am Ende der Brücke und ist mit dieser über ein Hilfsgerüst verbunden. Der Litzenstrang wird unter der Brücke hindurchgeführt und an einem geeigneten Punkt, zum Beispiel am Ende einer Verschiebbahn, befestigt. Somit bewegen sich der Litzenheber und damit auch die Brückenkonstruktion entlang der Verschiebbahn. Dieser Vorgang ist anhand der Abbildung 18 nachvollziehbar dargestellt.

Aufgrund der nahezu unbegrenzten Länge der Litzenseile können selbst lange Verschiebstrecken in einem Vorgang bewältigt werden.

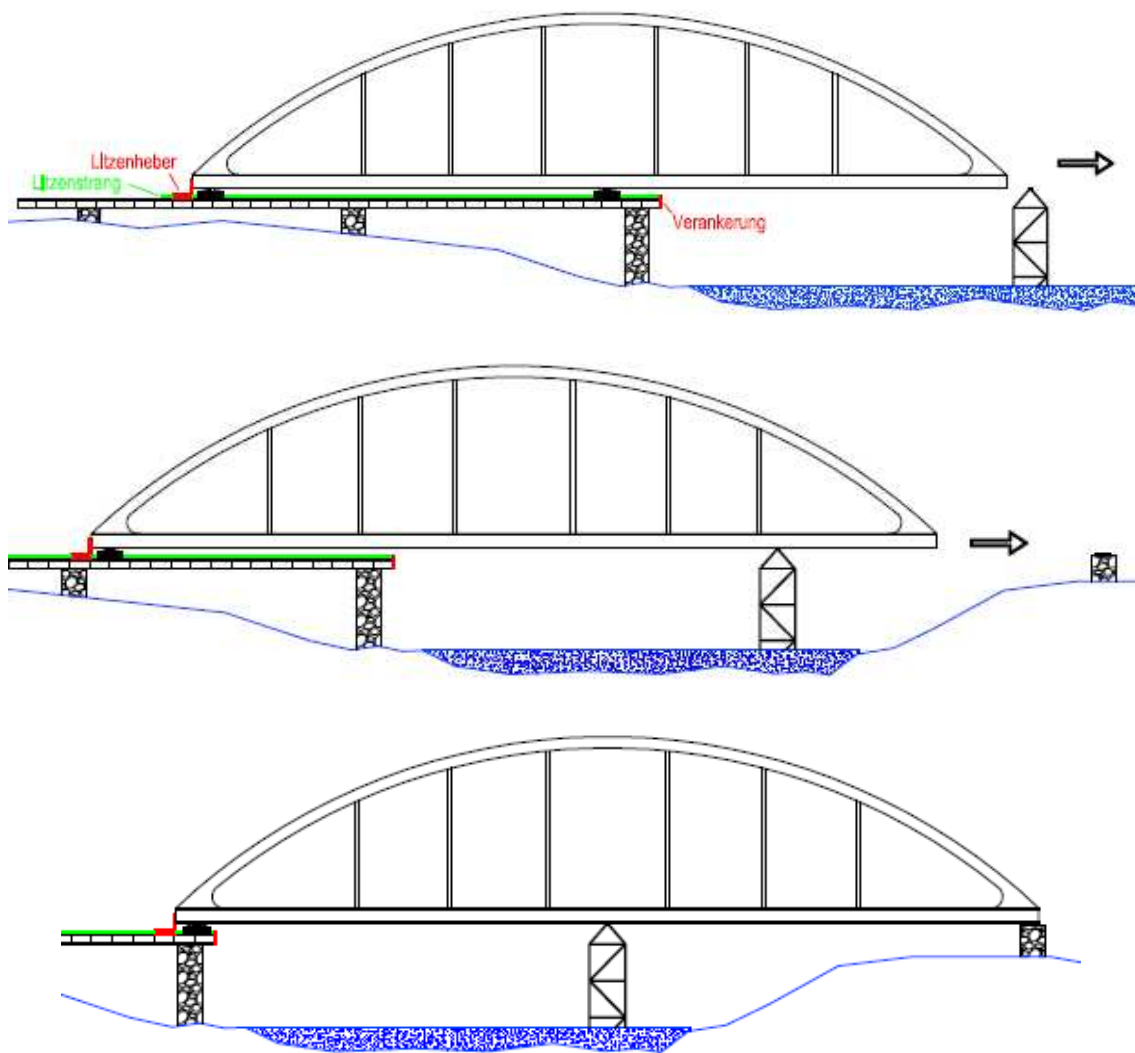


Abbildung 18: Vershubprinzip unter Verwendung von Litzenhebern



Abbildung 19: Vorschub mittels Litzenheber

• Vershub mittels Zugstange

Der Vershub mittels Zugstange kann prinzipiell mit dem eines Litzenhebers verglichen werden. Auch hier wird die Vershubhydraulik über eine Hilfskonstruktion am Brückenende befestigt und die Zugstange wird unter der Brücke hindurchgeführt. Der Unterschied besteht nur darin, dass anstatt eines Litzenstrangs nun ein Stahlrohr zum Einsatz kommt. Nachteilig an diesem System ist jedoch, dass aus logistischen Gründen das Rohr nur in transportfähigen Längen zum Montageplatz transportiert werden kann. Um einen langen Strang zu erzeugen, müssen diese Rohre erst verschweißt werden und demzufolge ist hier der Aufwand in der Montagevorbereitung hoch. Im Gegensatz dazu wird beim Litzenheber ein Stahlseil auf einer Rolle geliefert, abgerollt und in die gewünschte Länge geschnitten. Es ist also abzusehen, dass das System der Zugstange im Laufe der Zeit durch das System des Litzenhebers ersetzt wird, da die Vorteile hier überwiegen.



Abbildung 20: Vershubhydraulik mit Zugstange

• SLEE System

Eine spezielle Möglichkeit zur Realisierung des Vorschubes bietet die Firma VAN SEUMEREN Holland B.V. an. Dieses System besteht aus einer speziellen Verschiebbahn und einer Hydraulik. Die Verschiebbahn besteht aus zwei U-Profilen, dazwischen befinden sich drei kleine HEB-Profile mit aufgeschweißtem Blech (Abbildung 21). Die U-Profile sind außerdem im Abstand von 500mm mit Bohrlochern versehen. Darin wird die Hydraulik befestigt, die dann über eine Koppelstange mit einem Schlitten verbunden ist, welcher sich zwischen den beiden U-Profilen bewegt. Fährt die Hydraulik aus, so bewegt diese den Schlitten und damit die darauf befindliche Brückenkonstruktion. Nach 500mm Verschiebeweg hängt sich die Hydraulik selbstständig in das nächste Bohrloch ein und der Vorgang kann erneut wiederholt werden. Das Verfahren ist anhand der Abbildung 22 bis Abbildung 26 grafisch dargestellt.

Da die Verschiebbahn keine hohe Eigensteifigkeit besitzt, ist eine entsprechend steife Unterkonstruktion erforderlich. Die Bahnen sind vom Hersteller in den Längen 2500mm beziehungsweise 5500mm zu beziehen und können über Stöße beliebig miteinander verbunden werden.

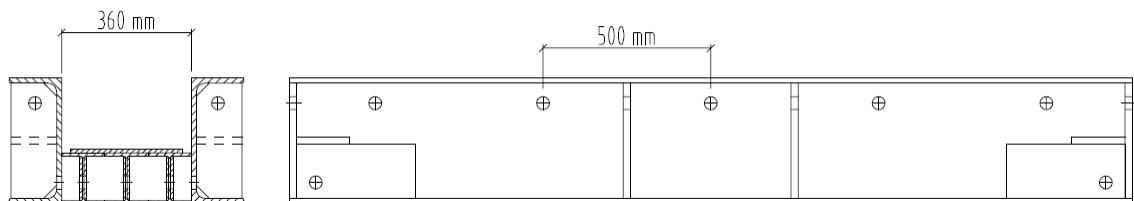


Abbildung 21: Querschnitt und Seitenansicht Verschiebbahn SLEE-System

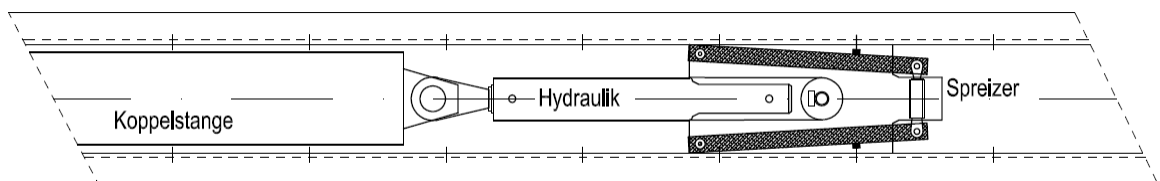


Abbildung 22: Einlegen der Hydraulik in die Verschiebbahn

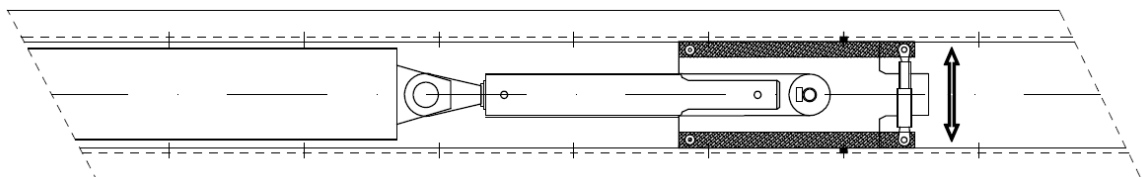


Abbildung 23: Ausfahren des Spreizers zum Fixieren der Hydraulik

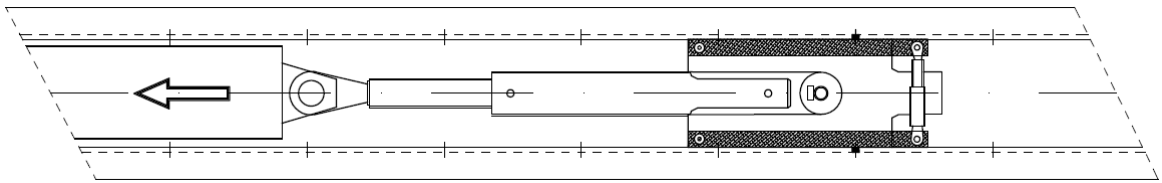


Abbildung 24: Ausfahren des Kolbens zum Bewegen der Last

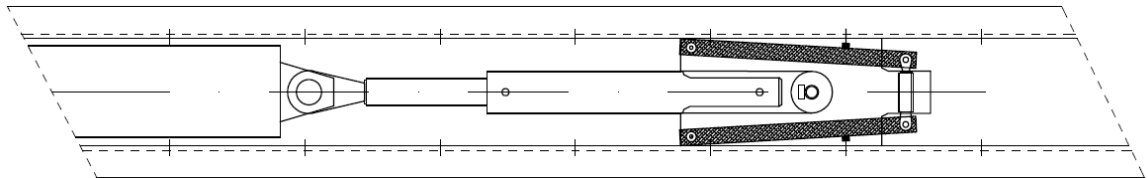


Abbildung 25: Lösen der Klemmen durch Einfahren des Spreizers

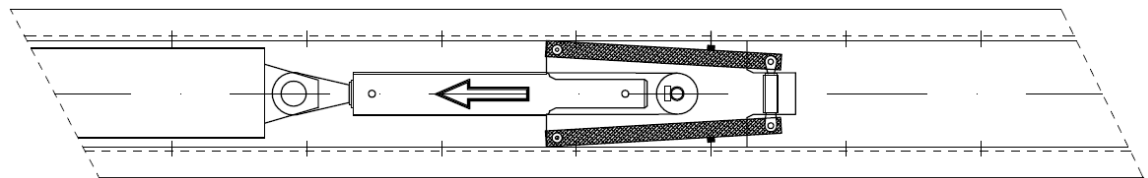


Abbildung 26: Bewegung der Hydraulik zum nächsten Bohrloch

• Push-Pull-Unit System von Hebetec

Dieses System wird von der Firma Hebetec angeboten. Es ist nur mit dem in Kapitel 2.2 beschriebenen APS-System kompatibel. Voraussetzung zum Einsatz ist demzufolge die Verwendung einer leichten oder schweren Vershubbahn. Grundprinzip dieses Systems ist, dass sich die Anlage an den Außenwänden der Vershubbahnen klemmt. Zwei Hydraulikzylinder sind einerseits mit der Klemmvorrichtung und andererseits mit dem APS verbunden. Durch Ausfahren der Zylinder wird der Vorschub realisiert. Nach durchgeführtem Vershub lösen sich die Klemmen, die Zylinder fahren ein und der Klemmenschlitten wird herangezogen. Der gesamte Vorgang ist anhand der Abbildung 28 nachvollziehbar dargestellt.

Vom Hersteller stehen drei Varianten mit einer Kapazität von 320kN, 1000kN und 1600kN zu Verfügung. Pro Schubvorgang kann die Last um bis zu 2000mm bewegt werden.

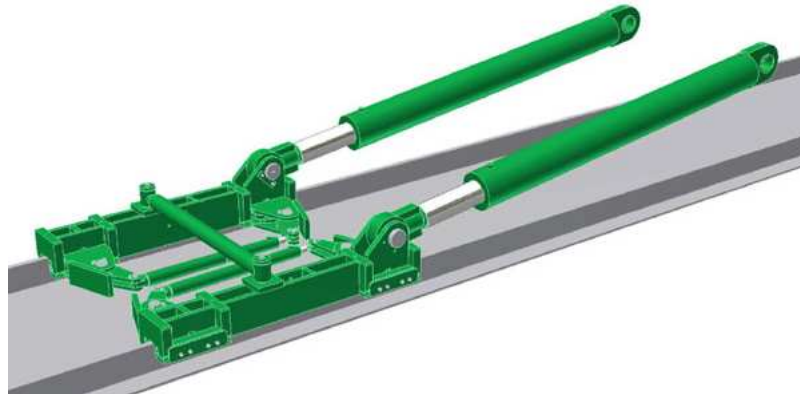


Abbildung 27: Push-Pull-Unit Anlage der Firma Hebetec

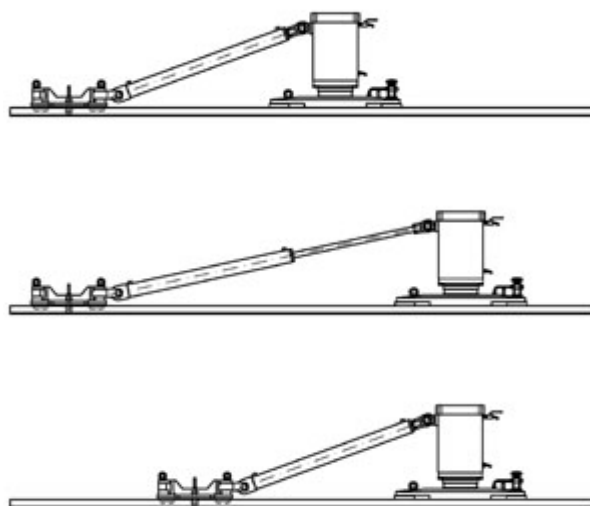


Abbildung 28: Vershubprinzip Push-Pull-Unit von Hebetec

• Push-Pull-Unit System von Mammoet

Die Anlage der Firma MAMMOET stellt ein weiteres Push-Pull-Unit System dar. Dieses ist in seiner Funktionsweise ähnlich dem Slee-System. Verwendet wird dies in Kombination mit dem in Kapitel 2.2 beschriebenen Gleitschuh- und Verschiebbahn-Systemen.

Die Push-Pull-Unit Anlage besteht in diesem Fall aus einer Verschiebhydraulik sowie einem Verfahrerschlepper. Dieser Schlepper wird mittels Rollen auf der Bahn geführt. Zum Anhalten während des Verschiebevorgangs befindet sich an der Unterseite des Schleppers eine Sperre. Diese wird beim Ausfahren der Hydraulik gegen die an der Außenseite der Verschiebbahn befindlichen Eckbleche geschoben und fixiert damit den Schlepper. Die Hydraulik, die zum einen mit dem Verfahrerschlepper fest und mit dem Gleitschuh über einen Bolzen verbunden ist, fährt aus und verschiebt somit den Gleitschuh und den darauf befindlichen Überbau. Fährt die Hydraulik wieder ein, so zieht diese den Schlepper hinter sich her, bis dieser am neuen Anhaltungspunkt angekommen ist. Die Sperre wird dabei beim Überfahren des Anhaltungspunktes automatisch eingezogen. Dieser Vorgang wird schrittweise wiederholt, um den Verschiebevorgang zu realisieren.

Die Verschiebeanlage steht in schwerer, mittlerer und leichter Ausführung zur Verfügung. Bei der schweren Variante wird eine Schubkraft von maximal 640kN erzeugt, der Verschiebeweg beläuft sich auf 1400mm.

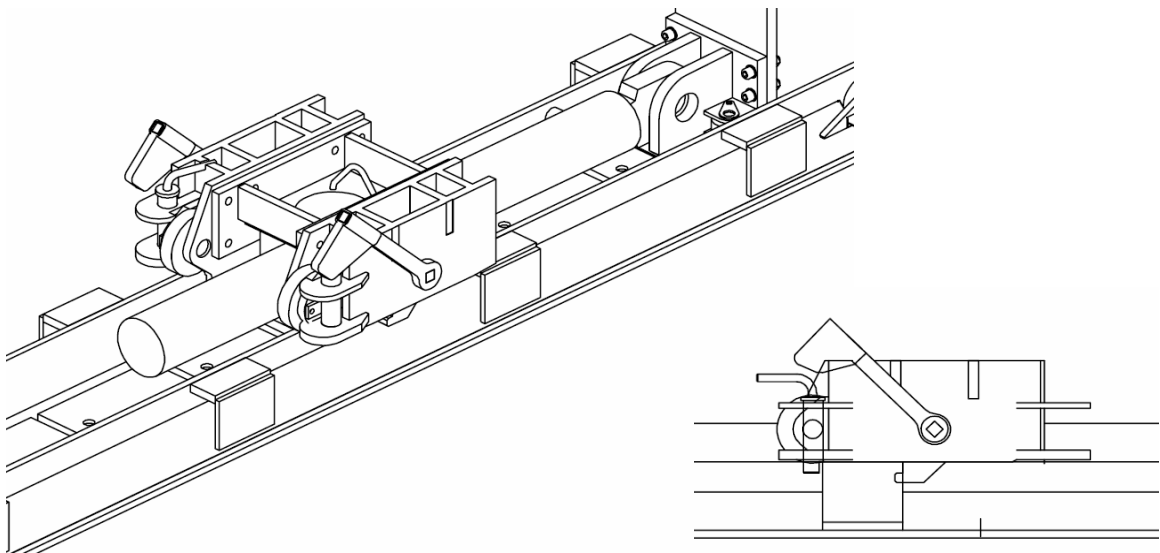


Abbildung 29: Push-Pull-Unit Anlage von Mammoet

• Vorschub mittels Winden

Ein einfaches, aber dennoch wirkungsvolles Prinzip ist der Vorschub mit Hilfe von Winden. Gerade bei kleineren Brücken mit geringen Gewichten muss nicht mit schwerer Technik aufgefahren werden. Hier reichen hydraulische, elektrische oder gar manuelle Winden meist völlig aus. Die erforderlichen Geräte, wie Winde, Umlenkrolle und Seile lassen sich einfach und schnell transportieren und die Montagevorbereitung kann zügig ausgeführt werden. Das Montageprinzip und der Montagevorgang sind mit den Systemen Litzenheber und Zugstange zu vergleichen. Auch hier wird das Seil unter der Brücke hindurchgeführt und sowohl einerseits mit dem Brückenfußpunkt als auch andererseits an einem geeigneten Verankerungspunkt befestigt. Die Vorschubbewegung wird durch Betätigung der Winden erzeugt.

Die Wahl des Einsatzes von hydraulischer, manueller oder elektrischer Winde richtet sich nach dem Gewicht der Brücke. Hydraulische Systeme erzeugen dabei Zugkräfte von bis zu 30t. Bei einem angenommenen Reibwert der Gleitlager von 3% könnte somit eine Brücke mit einem Eigengewicht von 1000t verschoben werden. Jedoch ist die Kapazität der Trommel auf maximal 70m Seillänge begrenzt. Bei elektrischen Winden sind bis zu 4t Zugkraft, bei manuellen bis zu 1t Zugkraft möglich. Beachtet werden muss außerdem, dass die Zugkraft abhängig von Seildurchmesser und Anzahl der Seillagen auf der Trommel ist. Grund dafür ist das sich verändernde Übersetzungsverhältnis. Je mehr Seillagen sich auf der Trommel befinden, desto geringer ist die maximal erreichbare Zugkraft.

• Verschub mittels kombinierter Hub-/Schubanlage

Bei dieser Verfahrensvariante zum Brückenverschub werden zwei Systeme gekoppelt, zum einen ein Hubvorgang und zum anderen ein Schubvorgang. Gerade bei der Taktverschiebung ist dieses System sinnvoll.

Die Verschubanlage besteht aus zwei Pressen, einer Hubpresse und einer Schubpresse. Die Hubpresse hat die Aufgabe die Konstruktion zu heben und damit vom eigentlichen Auflagerpunkt freizusetzen. Die Schubpresse ist mit der Hubpresse verbunden. Wird der Kolben der Schubpresse eingefahren, so bewegt diese den auf einem Schlitten befindliche Hubpresse und damit auch die Brückenkonstruktion. Ist der Kolben der Schubpresse ganz eingefahren, kann auch die Hubpresse eingefahren werden und der Überbau wird wieder auf dem eigentlichen Auflagerpunkt abgesetzt. Dieser Vorgang kann beliebig oft wiederholt werden, so dass die Brücke schrittweise verschoben wird. Das Funktionsprinzip kann anhand der Abbildung 30 nachvollzogen werden.

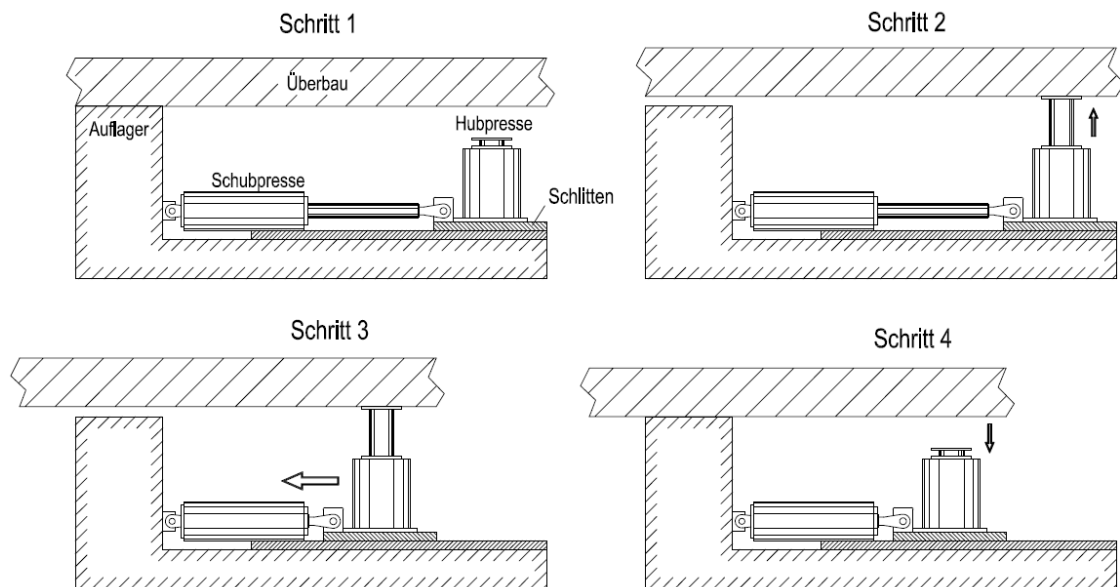


Abbildung 30: Funktionsprinzip Hub-/Schubanlage

• Enerpac – Hydrauliksystem

Bei dieser Variante handelt es sich um eine Entwicklung der Firma Enerpac. Dieses System wurde speziell für den Bau der Millau-Talbrücke entwickelt und hat damit eindrucksvoll deren Funktionalität unter Beweis gestellt.

Auch bei diesem System wird Hub- und Schubvorgang miteinander kombiniert. Die Anlage besteht im Wesentlichen aus zwei Zylindern, die jeweils unabhängig voneinander zwei gegenläufig angeordnete Keile bewegen. Der Brückenüberbau selbst lastet dabei auf dem Stützgerüst der Anlage. Ausgleichszylinder an der Unterseite sorgen für einen manuellen Ausgleich der Höhenlage. Abbildung 31 verdeutlicht den Aufbau grafisch.

Der Vorteil dieses Systems liegt darin, dass nur geringe horizontale Kräfte in die Pfeiler eingeleitet werden, da dieses System in sich geschlossen arbeitet. Die höchsten Pfeiler der Millau-Brücke sind 245m hoch. Zu große Horizontalkräfte hätten zum Versagen der schlanken Stützenpfeiler geführt und rechtfertigt daher die Entwicklung eines solchen Verschiebesystems.

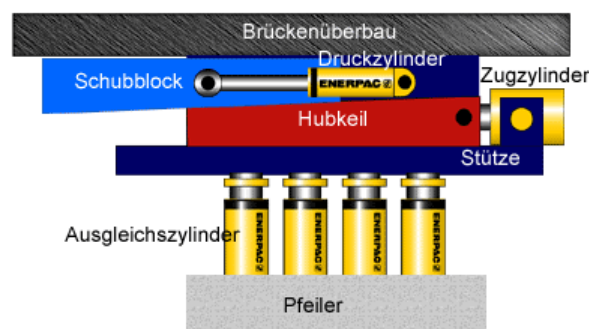
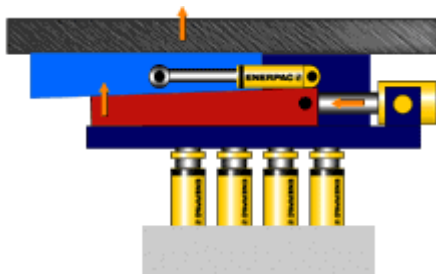


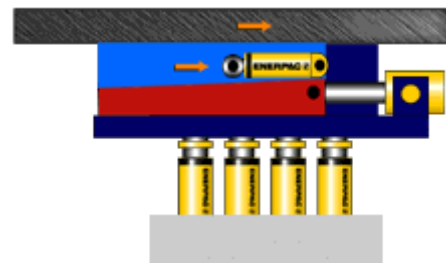
Abbildung 31: Aufbau Enerpac-Hydrauliksystem

Der Brückenverschub erfolgt in vier Schritten. Im ersten Schritt wird der Zugzylinder ausgefahren, dieser bewegt damit den Hubkeil in Richtung des Schubblocks. Dadurch laufen die beiden Keile aufeinander auf und der Schubblock wird gegen die Brücke gedrückt, wodurch der Überbau vom Stützgerüst freigesetzt wird. Im zweiten Schritt wird der Druckzylinder eingefahren und die freigesetzte Brücke wird damit verschoben. Im nachfolgenden Schritt wird der Zugzylinder wieder eingefahren, die Keile entspannen sich und die Brücke setzt wieder auf dem Stützgerüst auf. Zuletzt wird der Druckzylinder wieder ausgefahren, um den ursprünglichen Ausgangszustand wiederherzustellen.

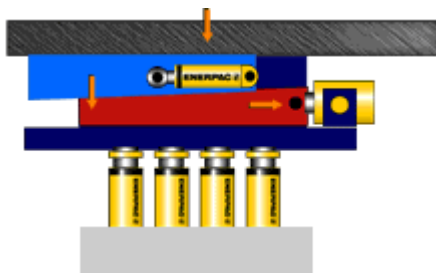
In jedem Vorgang können so 600mm Verschiebung zurückgelegt werden. Beim Bau der Millau – Brücke waren so mehrere tausend Hubvorgänge nötig, um das 2460m lange Bauwerk fertig zu stellen.



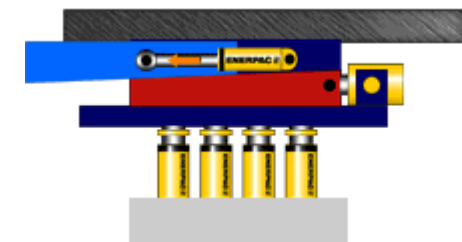
Zugzylinder ausfahren, die Keile laufen aufeinander auf und drücken die Brücke nach oben.



Druckzylinder einfahren, dadurch wird die Brücke verschoben.



Zugzylinder einfahren, die Keile entspannen sich und der Überbau setzt auf dem Stützgerüst auf.



Druckzylinder ausfahren, Ausgangszustand wiederhergestellt.

Abbildung 32: Verschiebprinzip Enerpac Anlage

2.5 Vershubhilfen

• SPMT

Bei den Self Propelled Modular Transporters, kurz SPMT, handelt es sich um fahrbare Plattformwagen, die zum Transport und Vershub von Brücken genutzt werden können. Diese Fahrzeuge bestehen aus mehreren Achsen, um die Lasten zu verteilen und somit die Pressung auf den Untergrund zu minimieren. Die Anzahl der Achsen ist abhängig von Größe und Eigengewicht der Brücke. Erhältlich sind diese Fahrzeuge mit vier und sechs Achsen. Jedoch können die SPMT beliebig in Länge und Breite miteinander gekoppelt werden. Die Tragkraft pro Achse beträgt dabei bis zu 30t. Des Weiteren ist es möglich, die Fahrzeughöhe um bis zu 700mm zu variieren, was ein selbstständiges Freisetzen nach erfolgter Lastübergabe sowie Anpassung der Höhe je nach Montagesituation ermöglicht. Zudem können die Räder bis zu 90° einlenken, dadurch sind alle denkbaren Fahrtrichtungswechsel ausführbar und der SPMT ist uneingeschränkt manövrierfähig. Angetrieben wird das Fahrzeug durch das Antriebsaggregat PU, welches in verschiedenen Leistungsabstufungen zur Verfügung steht. Abhängig von Last und Anzahl der gekoppelten SPMT wird ein entsprechend leistungsfähiges PU eingesetzt.

Der große Vorteil dieses Systems ist darin zu sehen, dass der Überbau im Gegensatz zur Vershubbahn an keine bestimmte Fahrtrichtung gebunden ist. Somit kann die Brücke direkt vom Vormontageplatz bis zum Einschub transportiert werden. Hiermit können auch größere Entfernungen zwischen Vormontage- und eigentlichem Bestimmungsort bewältigt werden. Neben dem Transport von Überbauten ist es auch möglich, die SPMT zum Vorschub zu nutzen, somit kann bei Verwendung dieser Fahrzeuge auf weitere Vorschubeinrichtungen verzichtet werden. Dieses System ist damit sehr vielfältig und flexibel einsetzbar.



Abbildung 33: SPMT

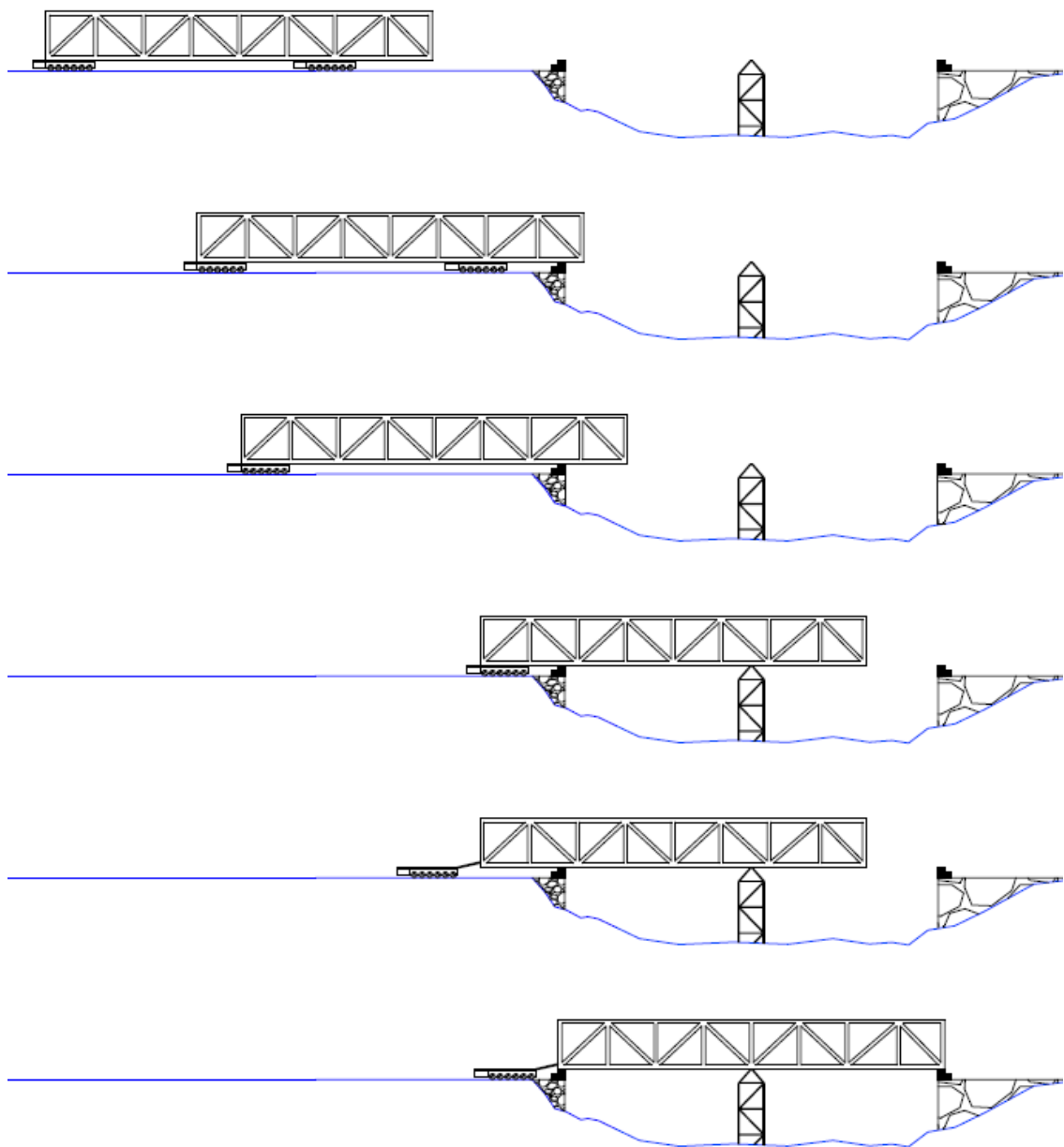


Abbildung 34: Verschubprinzip SPMT

• Ponton

Für die Überquerung von Wasserstraßen zur Montage von Brückenbauten steht die Nutzung eines Pontons zur Auswahl. Es handelt sich dabei um eine schwimmfähige Plattform, die jedoch selbst keinen eigenen Antrieb besitzt. Der Antrieb erfolgt entweder von Land aus oder zu Wasser mit Hilfe eines Schleppers. Im Inneren des Pontons befinden sich Hohlkammern, welche sich fluten und lenzen lassen um so den Tiefgang zu regulieren. Die Größe des Pontons richtet sich nach der wirkenden Vertikallast als Folge des Brückeneigengewichtes. Zum Übernehmen der Brückenkonstruktion wird ein Stützgerüst auf dem Ponton montiert, worauf die Konstruktion während des Verschubs ruht. Die Absicherung gegen seitliches Abweichen infolge Wind und Strömung kann mit Hilfe von Seilen und Winden erfolgen.

Der Montageablauf selbst läuft dabei in folgenden Schritten ab. Der Überbau wird landseitig soweit eingeschoben, dass der Ponton darunter fahren und die Konstruktion übernehmen kann. Der Ponton wird dazu geflutet und unter die Konstruktion geschoben und durch anschließendes Lenzen wird der Überbau übernommen. Die Konstruktion wird über externe Vorschubsysteme auf das gegenüberliegende Ufer geschoben. Nach Erreichen des Ufers und Positionierung über den Auflagern kann der Ponton geflutet werden und die Last übergeben. Für den Fall, dass der Überbau nicht samt Ponton verschoben wird, sondern über den Ponton gleitet, ist zu berücksichtigen, dass durch die sich verändernde Lagerreaktion der Tiefgang entsprechend angepasst werden muss.

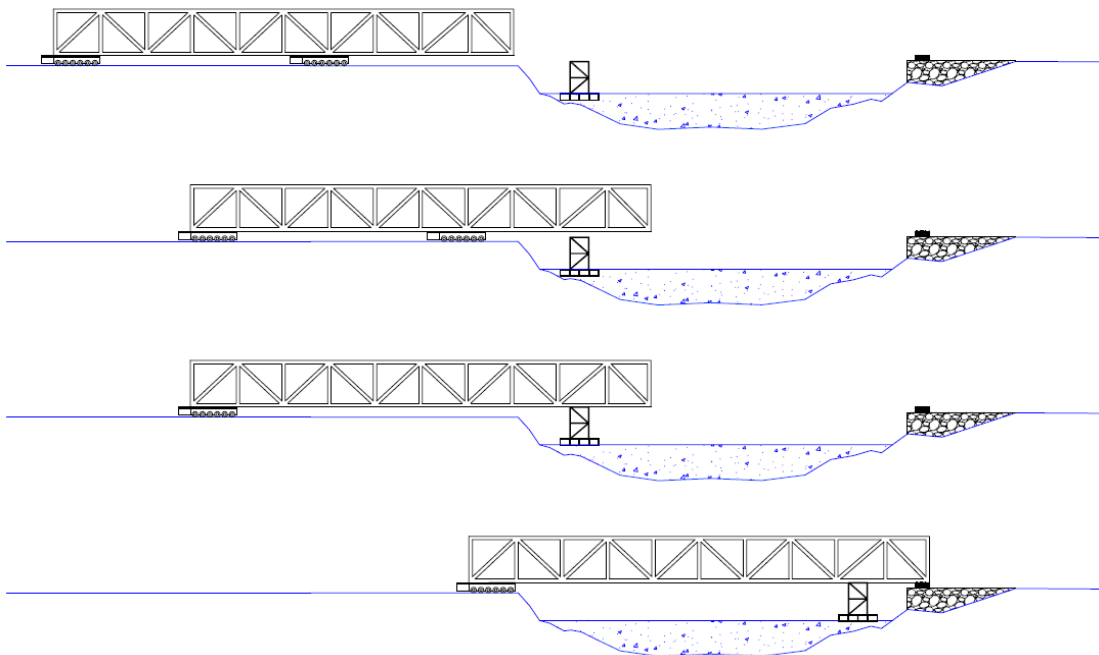


Abbildung 35: Verschiebprinzip Ponton

2.6 Vorschubrichtungen

Bei den Vorschubrichtungen kann im Allgemeinen zwischen Längsvorschub und Quervorschub differenziert werden. Längsvorschub bedeutet dabei Vershub in Richtung der Brückenlängsachse, Querschub senkrecht zur Brückenlängsachse (Abbildung 36).

Der Quervorschub kommt vorrangig zum Einsatz, wenn eine bestehende Brücke ersetzt werden soll und für die Montage nur ein begrenztes Zeitfenster zur Verfügung steht. Die Brücke wird dazu vormontiert und direkt neben der bestehenden positioniert. Dazu kann es notwendig sein, den Überbau mittels Längsvorschub in den Ausgangszustand für den Quervorschub zu positionieren. Ist die bestehende Brückenkonstruktion entfernt, kann die neue Überführung in Querrichtung eingeschoben werden. Der gesamte Vorgang, von Abriss bis Einschub, kann somit in wenigen Tagen ausgeführt werden. Nachteilig am Quervorschub ist jedoch, dass meist ein Längsvorschub vorangehen muss, um die Brücke über ein Tal oder eine Wasserstraße zu befördern. Diese Methode ist kostenintensiver und lohnt sich vorrangig bei sehr eng definierten Montagezeiträumen, wie zum Beispiel beim Bau von Eisenbahnüberführungen.

Im Zusammenhang mit Längsvorschub ist hier auch das Taktverschieben zu nennen. Dieses Verfahren kommt häufig beim Bau von Großbrücken zum Einsatz. Dabei wird der Überbau nicht vollständig vormontiert, sondern einzelne Schüsse werden im Taktkeller zu einem Takt gefertigt. Nach jedem fertig gestelltem Takt wird dieser um seine Länge verschoben und ein neuer Takt kann gefertigt werden. Dieses Verfahren vereint somit die Fertigung und Montage an einem Ort.

Eine weitere Möglichkeit, die sich auf Spezialfälle der Brückenmontage beschränkt, ist das Eindrehen von Brückenbauwerken. Dieses Verfahren kam unter anderem beim Bau der Apollo-Donau Brücke in Bratislava [24] zum Einsatz. Dabei befindet sich auf einer Seite unterhalb des Brückenhauptträgers ein Drehgelenk, welches gleichzeitig den Mittelpunkt des Drehradius darstellt. Unterhalb des zweiten Brückenhauptträgers muss dann eine Vershubbahn mit einem entsprechenden Radius vorgesehen werden (siehe Abbildung 38). Das gegenüberliegende Ende des Überbaus ruht bei der Montage an Land entweder auf einer weiteren Vershubbahn mit einem entsprechenden Radius oder bei der Montage über einen Fluss auf einem Ponton.

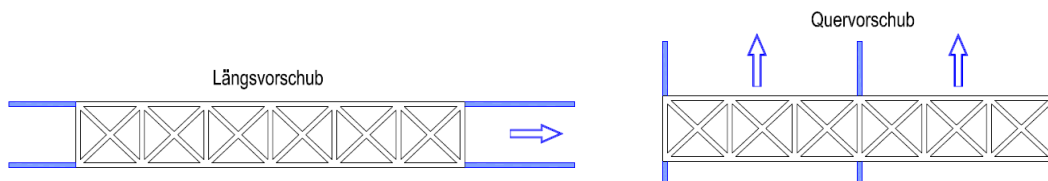


Abbildung 36: Prinzip Längs- und Quervorschub

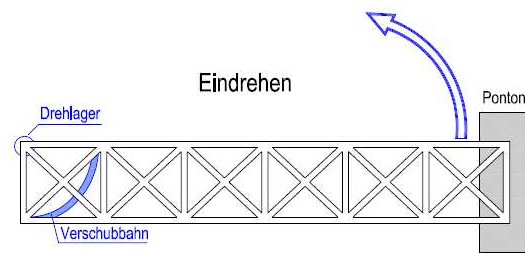


Abbildung 37: Prinzip Eindrehen von Brücken



Abbildung 38: Verschubbahn mit Radius zum Eindrehen von Brücken

2.7 Einhaltung von Höhenkoten

Die exakte Einhaltung von Höhenpunkten, während des Verschubs, ist von entscheidender Bedeutung. Diese Höhenpunkte können beispielsweise das Erreichen eines Verschublagers auf einem Pfeiler darstellen. Diese Forderung ist bestimmend für das Montagekonzept und den Montageablauf. Schon in der Planungsphase und der späteren statischen Dimensionierung der Brücke muss dies Berücksichtigung finden. Zur Überlegung, wie man gegebene Höhenpunkte erreicht, stehen folgende Möglichkeiten zur Auswahl:

- Aufstapeln der Brückenkonstruktion
- Verwendung eines Vorbausnabels
- Vershubpendel
- Ballastieren am Brückenende
- Fluten und Lenzen bei der Montage mittels Ponton

Die Wahl des geeigneten Konzeptes hängt dabei von den Rahmenbedingungen ab. Einflüsse nehmen unter anderem Stützweite und Anzahl der Auflagerpunkte im Verhältnis zur Brückenlänge und Steifigkeit der Konstruktion. Bildet sich während des Verschubs ein großer Kragarm aus und ist die Steifigkeit des Überbaus zudem gering, so ist mit großen Verformungen der Kragarmspitze zu rechnen. Dies würde dazu führen, dass die Konstruktion nicht auf ein vorhandenes Auflager auflaufen kann. Es muss also sichergestellt werden, dass die zu erwartende Durchbiegung in irgendeiner Form anderweitig ausgeglichen werden kann. Die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten werden im Einzelnen in den folgenden Kapiteln beschrieben.

• Aufstapeln der Brückenkonstruktion

Beim Aufstapeln wird die Konstruktion angehoben und auf einer entsprechenden Unterkonstruktion abgesetzt. Dies kann ein Rollwagen, Fluidts[®], Montageunterkonstruktion etc. sein. Die Brücke wird damit oberhalb der Auflagerebene verschoben. Eventuell auftretende Durchbiegungen können somit durch entsprechendes Anpassen der Stapelhöhe ausgeglichen werden. Meist ist das Aufstapeln zwangsläufig durchzuführen, um überhaupt Rollwagen oder Gleitschuhe unter dem Überbau positionieren zu können. Unnötiges Aufstapeln sollte jedoch vermieden werden, da dies zusätzlichen Zeitaufwand und demzufolge Kosten mit sich bringt.

• Verwendung von Vorbausch-nabeln

Als weitere Möglichkeit zur Einhaltung von Höhenkoten stehen mehrere Varianten für Vorbausch-nabelkonstruktionen zur Verfügung. Bei einem Vorbausch-nabel handelt es sich um einen stählernen Vorbau am auskragenden Ende der Brückenkonstruktion. Dieser dient dazu, das Bauwerk frühzeitiger auf einem Widerlager auftreten zu lassen. Damit lassen sich übermäßige Kragarme der Brückenkonstruktion im Montagezustand vermeiden und Höhendifferenzen infolge Verformungen überbrücken. Auch bei Spannweiten zwischen zwei Versuchs-lagern, die größer sind als die Hälfte der Brückenlänge, kann durch das Verlängern mittels Vorbausch-nabels auf zusätzliche Hilfsstützen verzichtet werden.

Die Verwendung eines Brückenschnabels muss jedoch schon bei der statischen Berechnung des Überbaus berücksichtigt werden, da zum einen dessen Eigengewicht als auch die veränderte Auflagersituation der Brücke Einfluss auf den Schnittkraftverlauf nimmt.

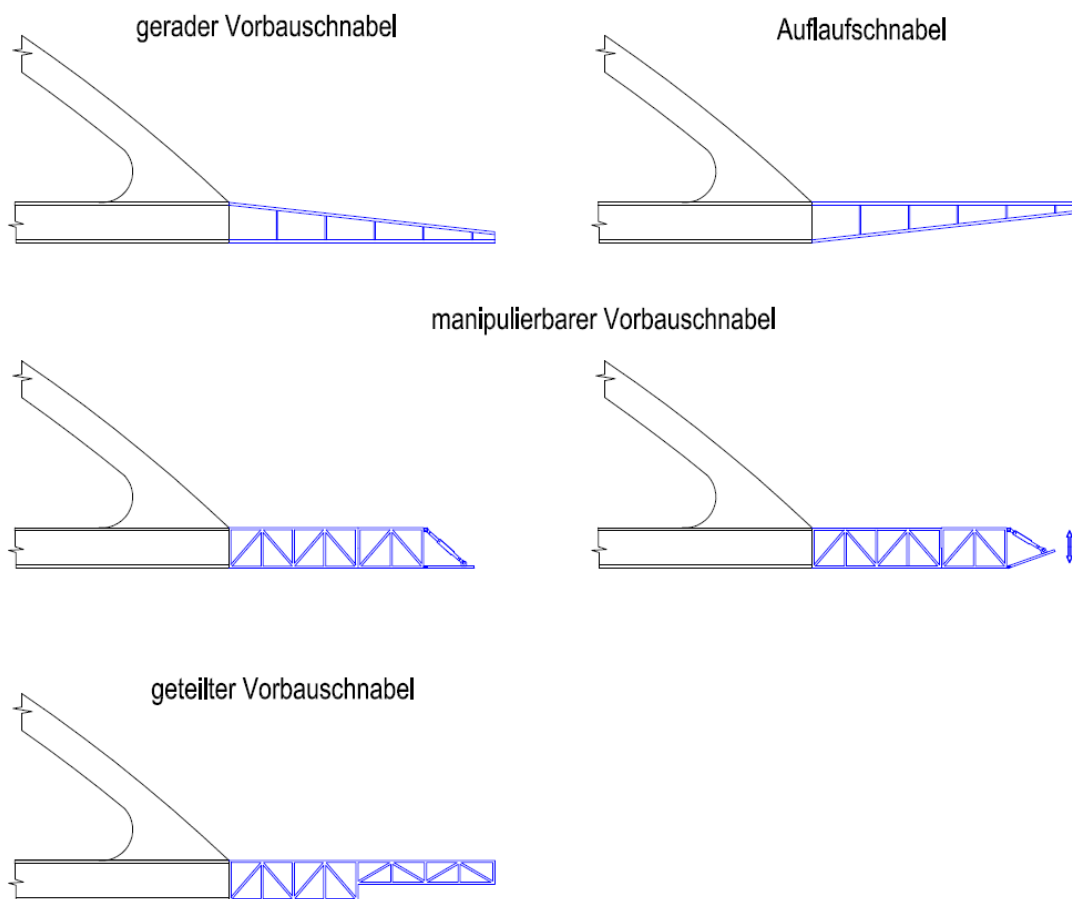


Abbildung 39: Übersicht Vorbausch-nabelarten

Aus Abbildung 39 gehen die verschiedenen Konzepte für Vorbauschnabelkonstruktionen hervor. Dabei kann zwischen vier Variationen unterschieden werden:

- gerader Vorbauschnabel
- Auflaufschnabel
- geteilter Vorbauschnabel
- manipulierbarer Vorbauschnabel

Der gerade Vorbauschnabel findet dabei häufig Anwendung. Diese Variante kann prinzipiell als Verlängerung des Brückenuntergurttes angesehen werden. Dadurch wird einem zu weiten Auskragen und damit verbundenem Durchbiegen der Brückenkonstruktion vorgebeugt. Die konische Form resultiert dabei aus dem Verlauf der Schnittkräfte.

Die Ausführung erfolgt als Vollwand- oder Fachwerkstruktur. Bevorzugt werden dabei als Hauptträger geschweißte Vollwandprofile eingesetzt. Die Kopplung zur horizontalen Lastabtragung erfolgt dann über Fachwerkstrukturen. Der Vorteil an diesem System liegt darin, dass der Vorbauschnabel bei Erreichen des Widerlagers plan auf den dort befindlichen Gleitlagern aufliegt. Ein bestimmtes Maß an Durchbiegung kann über Pressen, welche sich unter den Auflagern befinden, ausgeglichen werden.

Die Anwendung eines Auflaufschnabels ist weiterhin möglich. Die Konstruktionsweise kann mit der des geraden Schnabels verglichen werden, mit dem Unterschied, dass die Anbaulage 180° gedreht erfolgt. Damit befindet sich die konische Form im Untergurtbereich. Diese wird dazu genutzt, trotz auftretender Durchbiegung des Kragarms, den Vorbauschnabel auf ein Widerlager auflaufen zu lassen. Von Nachteil ist, dass aufgrund der konischen Form der Untergurt nicht plan auf den Gleitlagern aufliegen kann.

Die beiden gerade beschriebenen Systeme, gerader Vorbauschnabel und Auflaufschnabel, sind prinzipiell bei geringen zu erwartenden Durchbiegungen sinnvoll einzusetzen. Bei großen auftretenden Durchbiegungen sind die beiden nächsten Systeme, geteilter und manipulierbarer Vorbauschnabel, diesbezüglich eine sinnvolle Alternative.

Der geteilte Vorbauschnabel besteht im Wesentlichen aus zwei Profilgrößen, beziehungsweise zwei unterschiedlichen Fachwerkhöhen. Die Differenz der Profil- oder Fachwerkhöhen ergibt sich aus der auftretenden Durchbiegung. Ziel während der Montage ist es, die schmale Schnabelspitze über das Auflager beziehungsweise eine Presse zu schieben. Mit Hilfe einer Hydraulik kann die Spitze dann soweit gehoben werden, dass auch die höhere Schnabelkonstruktion auf das Widerlager auflaufen kann.

Eine weitere Möglichkeit, große Durchbiegungen zu kompensieren, ist der Anbau eines manipulierbaren Vorbauschnabels denkbar. Es kann entweder nur die Schnabelspitze oder der gesamte Vorbauschnabel hydraulisch angehoben und abgesenkt werden. Dies ist abhängig von den zu erwartenden Verformungen. Um den Vorbauschnabel auf das Auflager auflaufen zu lassen, wird die Schnabelspitze zunächst angewinkelt, über das Verschlager geschoben und wieder abgesenkt. Dadurch drückt die Hydraulik den Schnabel und damit auch den gesamten Überbau selbstständig auf das Niveau der Auflagerebene.

Die Funktionsweise der beiden zuletzt beschriebenen Systeme können der Abbildung 40 und Abbildung 41 entnommen werden.

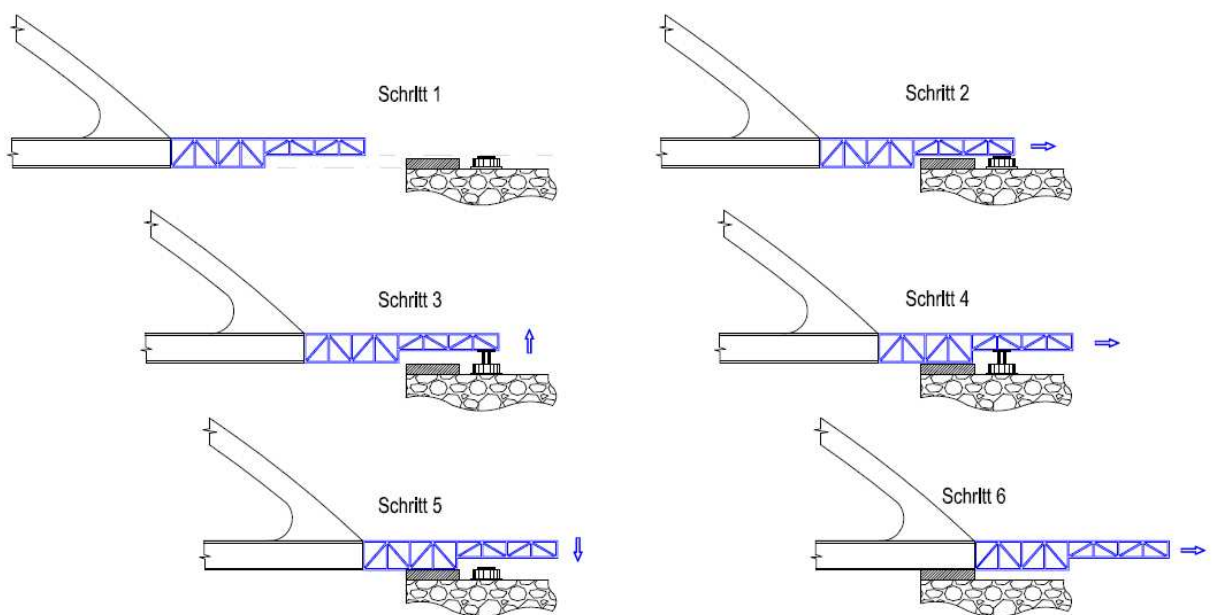


Abbildung 40: Vershubprinzip unter Verwendung eines geteilten VBS

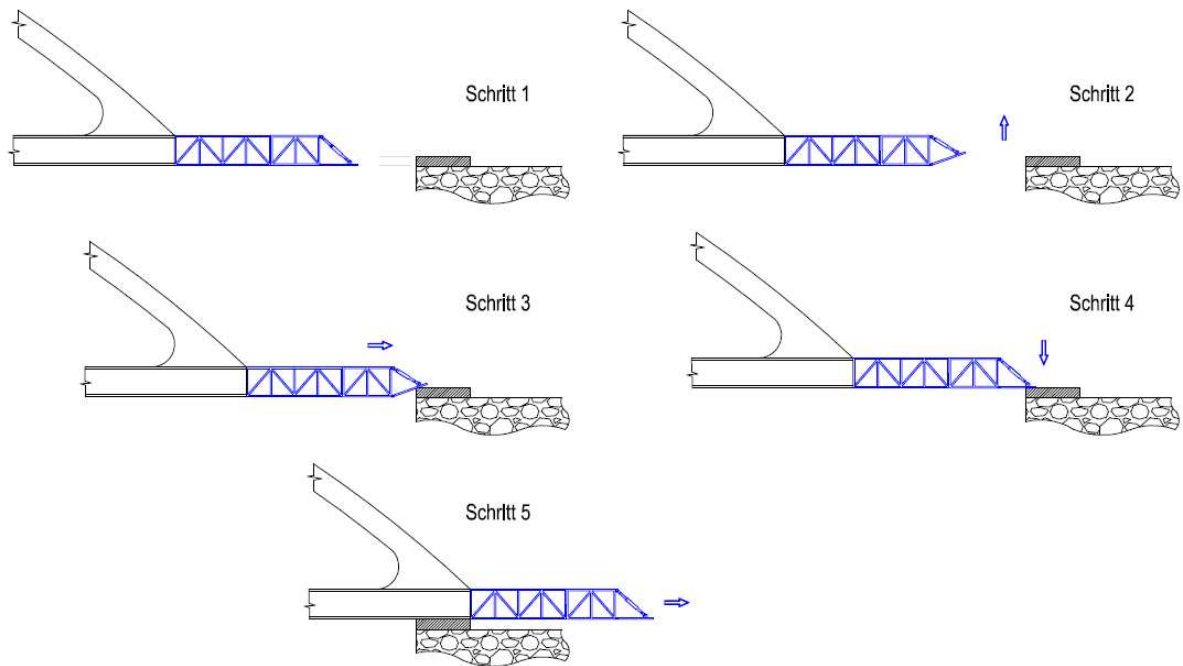


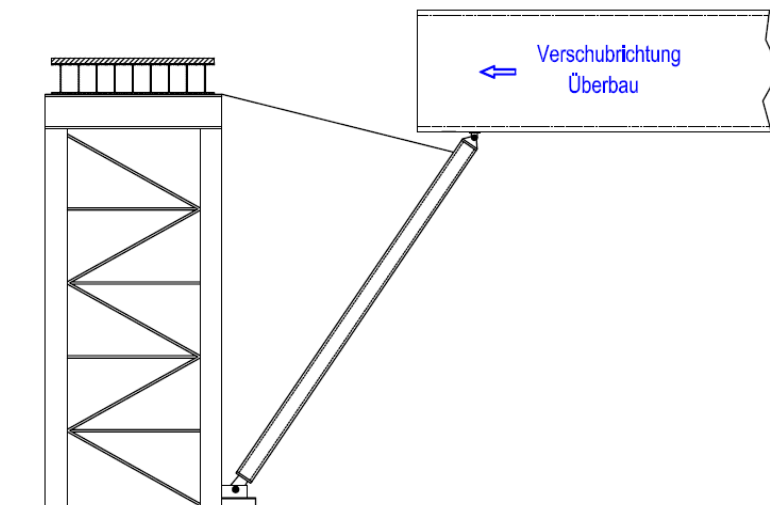
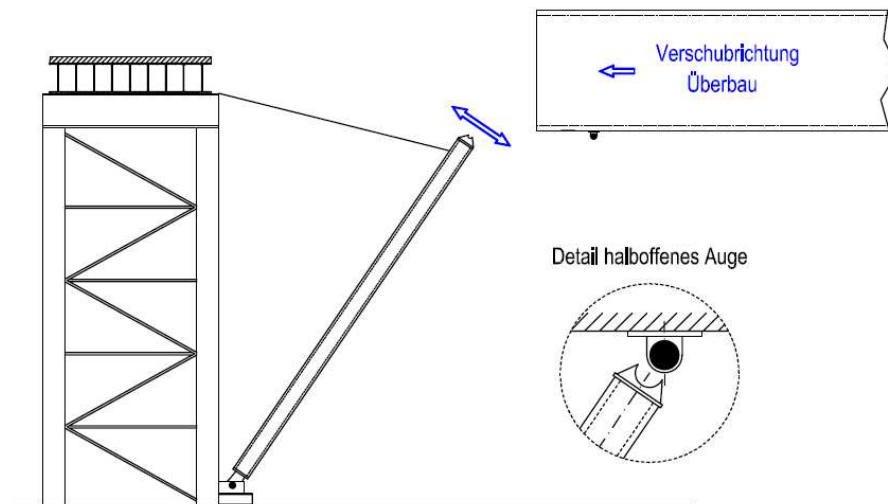
Abbildung 41: Verschiebprinzip unter Verwendung eines manipulierbaren VBS

• Verschiebpendel

Große auftretende Verformungen an der Kragarmspitze führen bei Verschiebmontagen immer wieder zu neuen Überlegungen, um diese Höhendifferenzen zwischen Schnabelspitze und Auflager ausgleichen zu können. Aus diesen Überlegungen heraus stellt das Verschiebpendel eine weitere Alternative zum Anbau eines Vorbauschnabels dar.

Das Prinzip des Verschiebpendels ist sowohl einfach, als auch genial. Am Fuße der Verschiebstütze, auf der die Brückenkonstruktion auflaufen soll, wird ein gelenkiger Lagerpunkt angebracht. An diesem wird die Verschiebstütze in Form eines Pendelstabes befestigt. Dieser besteht im Wesentlichen aus zusammengeflanschten Rohrstücken, um die Länge des Stabes variieren zu können. Am Kopf befindet sich zudem eine halboffene Bolzenaufnahme. Je ein Verschiebpendel wird demzufolge unter den Hauptträgern positioniert und über einen horizontalen Riegel zu einem Rahmen gekoppelt. Ein Seil zwischen Pendelkopf und Stützenkopf sorgt dafür, dass der Pendelstab nach vorn gekippt werden kann und zwar soweit, dass die sich nähernde Brücke auf die Pendelstütze auflaufen kann. Dazu befinden sich an der Unterseite des Überbaus Konsolen mit Lagerbolzen, in welche die halboffenen Bolzenaufnahmen eingreifen können. Wird die Brückenkonstruktion nun weiter verschoben, drückt sich diese automatisch mit den Pendelstützen in Form des sich abbildenden Kreisbogens nach oben. Hat sich die Pendelstütze vollständig aufgerichtet, wird die Brückenspitze am Verschieblager übernommen.

Dieses System ist jedoch nur sinnvoll, wenn die Höhendifferenz zwischen Stützenfuß und Überbau und damit die Länge des Pendelstabs nicht zu groß wird, da ansonsten der Pendelstab aufgrund der Biegeknickgefahr zu groß dimensioniert und damit unwirtschaftlich gegenüber anderen Varianten wird.



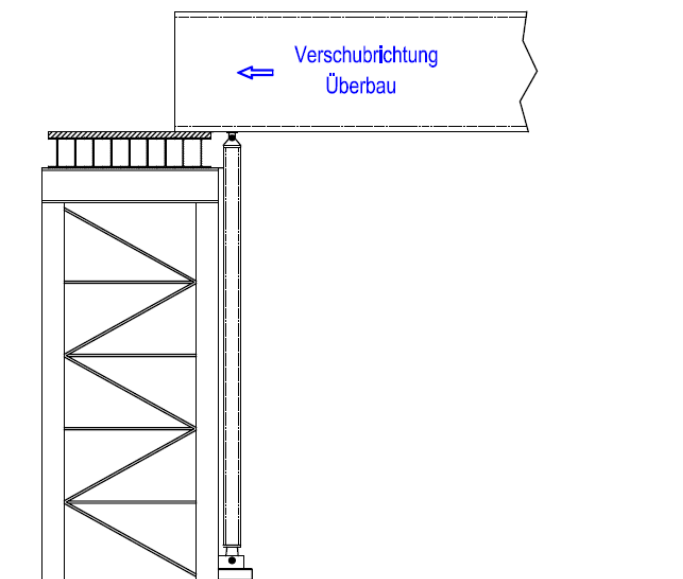


Abbildung 42: Verschiebprinzip Verschiebpendel

• Fluten und Lenzen

Das Prinzip des Flutens und Lenzens beim Verschieb mittels Ponton ist eine weitere Möglichkeit zum Erreichen definierter Höhenkote. Der Ponton ist im Inneren mit Hohlkammern versehen, die für den Auftrieb sorgen. Werden diese geflutet, so sinkt der Ponton entsprechend der Höhe des Wasserstandes in den Hohlräumen. Durch Lenzen wird das Wasser wieder aus den Hohlräumen gepumpt und der Ponton steigt nach oben. Für den Verschiebvorgang kann dies zu Nutze gemacht werden. Um die Brückenkonstruktion auf den Ponton zu schieben, wird dieser zunächst geflutet, unter den Überbau geschoben und anschließend gelenzt, um die Konstruktion zu übernehmen. In umgekehrter Reihenfolge geschieht dies am gegenüberliegenden Ufer bei der Übernahme der Konstruktion am Auflager.

• Ballastieren

Beim Vorgang des Ballastieren werden Gegengewichte auf dem Brückenende platziert. Dies bewirkt, dass der Überbau weiter auskragen kann, ohne die Lagesicherheit zu gefährden. Jedoch führt ein längerer Kragarm auch zwangsläufig zu größeren Verformungen. Um diese zu kompensieren, muss entweder die Brücke von vorn herein in erhöhter Einbaulage eingeschoben werden, oder der vorderseitige Auflagerpunkt wird höher aufgestapelt als der hintere. Dadurch wird die Konstruktion leicht schräg verschoben, was ebenfalls der Verformung entgegenwirkt. Beim Vorgang des Ballastierens ist jedoch zu berücksichti-

gen, dass das Gesamtgewicht der zu verschiebenden Konstruktion um den Anteil der Ballastgewichte zunimmt. Dies führt zu erhöhten Beanspruchungen in den Verschublagern oder bei Verwendung einer Verschubbahn zu einer größeren Belastung in den Vershubträgern. Entsprechend dieser höheren Einwirkungen sind die am Vershub beteiligten Komponenten auszulegen, was unter Umständen zu Mehrkosten führt.



Abbildung 43: Ballastieren von Brücken

2.8 Sicherung beim Brückenvershub

Beim Vershub von Brücken in waagerechter Position sowie planmäßig im Gefälle sind zur Sicherung gegen ungewolltes Abgleiten des Überbaus Rückhaltesysteme vorzusehen. Beim Schieben bergaufwärts kann auf derartige Absicherungsmaßnahmen verzichtet werden. Als Rückhaltung werden häufig Winden oder hydraulische Greifzüge eingesetzt. Die Wahl richtet sich dabei nach den zu erwartenden Kräften, die von der Rückhaltung aufgenommen werden müssen. Je steiler das Gefälle beim Verschieben bergabwärts, desto größer sind die Kräfte, die gehalten werden müssen. Bei großen zu erwartenden Lasten müssen unter Umständen aufwendigere Rückhaltungen vorgesehen werden.

Das Rückhaltesystem ist so an der Brücke anzubringen, dass es bei Bedarf sofort greifen kann. Dazu werden die Seile der Winden etc. entgegen der Vorschubrichtung leicht gespannt, jedoch nur so weit, dass es die Vorschubbewegung nicht behindert. Die Seile werden während des Verschubs schrittweise nachgezogen.

Zur Absicherung des Überbaus gegen ungewolltes Abgleiten bei längeren Vershubpausen, beispielsweise beim Taktschiebeverfahren, bei dem nur in bestimmten Frequenzen verschoben wird, bietet es sich an, die PTFE-Verschublager, auf denen der Überbau ruht, durch einfache Holzklötzer zu ersetzen. Dazu wird der Überbau angepresst und die PTFE-Gleitplatte wird ausgetauscht. Da Holz einen wesentlich höheren Reibwiderstand besitzt, wird somit ein ungewolltes Abgleiten wirkungsvoll verhindert.

2.9 Gleitwerkstoffe für Verschlusslager im Brückenbau

Maßgeblich für den Verschluss von Brückenbauwerken ist nicht nur die Wahl eines geeigneten Verschluss- und Verschluss-systems, sondern auch die Berücksichtigung des verwendeten Gleitwerkstoffes. Schon die statische Auslegung der Brücke im Montagelastfall hängt vom verwendeten Gleitwerkstoff ab. Die Reibung, die während des Verschlussvorgangs auftritt, muss in Form von horizontalen Kräften von der Konstruktion aufgenommen werden. Des Weiteren ist die Reibung auch maßgebend für die Wahl des Verschluss-systems, denn dieses muss die Reibungskräfte überwinden, um den Überbau in Bewegung zu versetzen. Als Gleitpaarungen werden häufig teflonbeschichtete Elastomerplatten (PTFE) in Verbindung mit Edelstahlplatten verwendet. Der Reibungswiderstand dieser beiden Werkstoffe liegt bei 2% bis 3,5%. Dies bedeutet, dass bei einer vertikalen Last von 1000kN während des Verschlusses eine horizontale Kraft von 20kN bis 35kN wirkt. In diesem Fall müsste eine Presse mit mindestens 35kN Schubkraft verwendet werden, um die Brückenkonstruktion zu verschieben.

Firma Eiffel Deutschland Stahltechnologie GmbH hat eigens zum Zweck des Brückenverschlusses eine Verschlussgleitplatte entwickelt. Diese Platte besteht aus dem Material PTFE, welche mit Schmier-taschen versehen sind. Durch Schmieren der Gleitplatte und des Überbauuntergurtes wird somit ein sehr kleiner Reibwiderstand erzielt. Diese Gleitplatten stehen in verschiedenen Abmessungen zur Verfügung. Hinsichtlich des Verschleißes ist die Grenze erst erreicht, wenn die Abnutzung so stark ist, dass der Überbau droht auf dem Verschlusslagerblock aufzuliegen. Die Grenze dafür liegt bei circa 3mm Abnutzung.

3 Vershubkonzept Eisenbahnüberführung Stör und Montagelastfall

3.1 Konstruktionsweise der neuen Eisenbahnüberführung

Die Erneuerung der Gleisstrecke 1210 für die Verbindung Elmhorn – Westerland sieht am Kilometer 64,177 den Neubau einer Eisenbahnüberführung vor. Der Standort der bestehenden Brückenkonstruktion liegt nördlich von Hamburg, nahe Itzehoe und führt über die Bundeswasserstraße Stör. Die beiden bestehenden, jeweils eingleisigen Fachwerkbrücken, sollen durch zwei einfeldrige, eingleisige Stabbogenbrücken mit einer Stützweite von 52,50m und einer Gesamtlänge von 54,00m ersetzt werden. Diese werden in baugleicher Weise gefertigt, um die beiden vorhandenen Überbauten zu ersetzen. Im Aufbau besteht jede Brücke aus zwei I-förmigen Versteifungsträgern mit einer Höhe von 1650mm und einem Achsabstand von 6500mm. Ein Fahrbahnblech sowie 84 Querträger bilden die Fahrbahnplatte. Die beiden Bögen werden als dichtgeschweißtes Kastenprofil ausgeführt. Die Bogenhöhe verjüngt sich dabei von 1050mm am Bogenrand auf 600mm in Bogenmitte. Die Breite der Kastenprofile bleibt mit 500mm hingegen konstant über die gesamte Länge. Zur Kopplung der Bögen werden vier Riegel, ebenfalls als Kastenprofil, ausgeführt. Die Verbindung zwischen Bogen und Fahrbahn erfolgt über sechs Hänger je Seite. Die Ausführung erfolgt in den Stahlsorten S235 und S355. Die Querschnitte, sowie die Konstruktionsweise, können der Abbildung 44 bis Abbildung 46 entnommen werden.

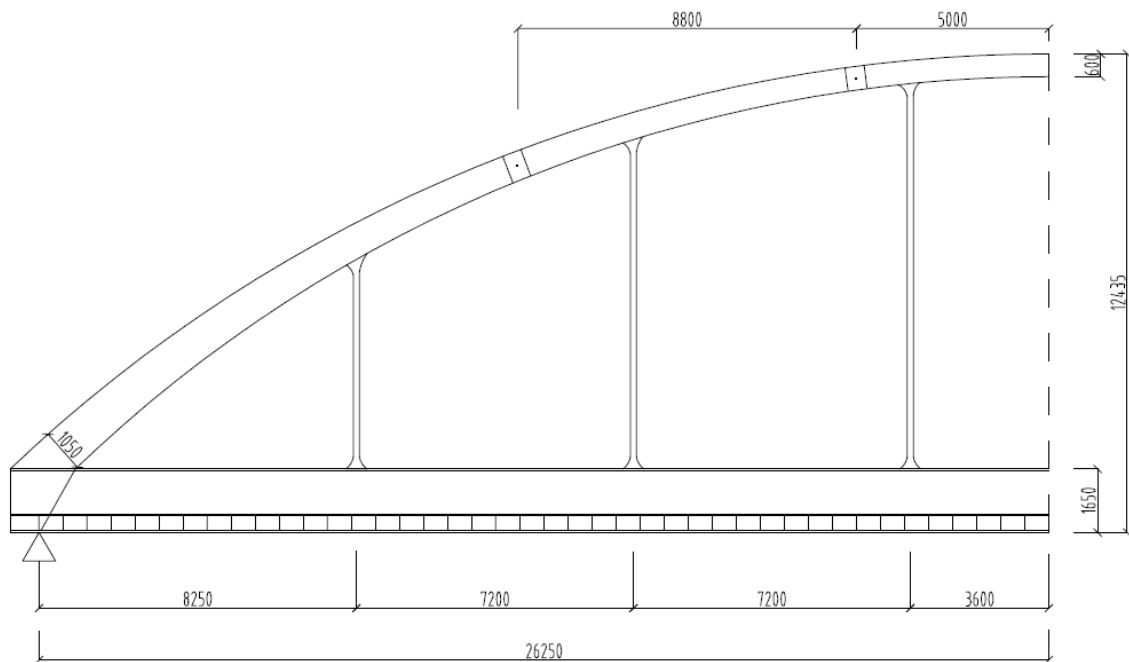


Abbildung 44: Seitenansicht EÜ Stör

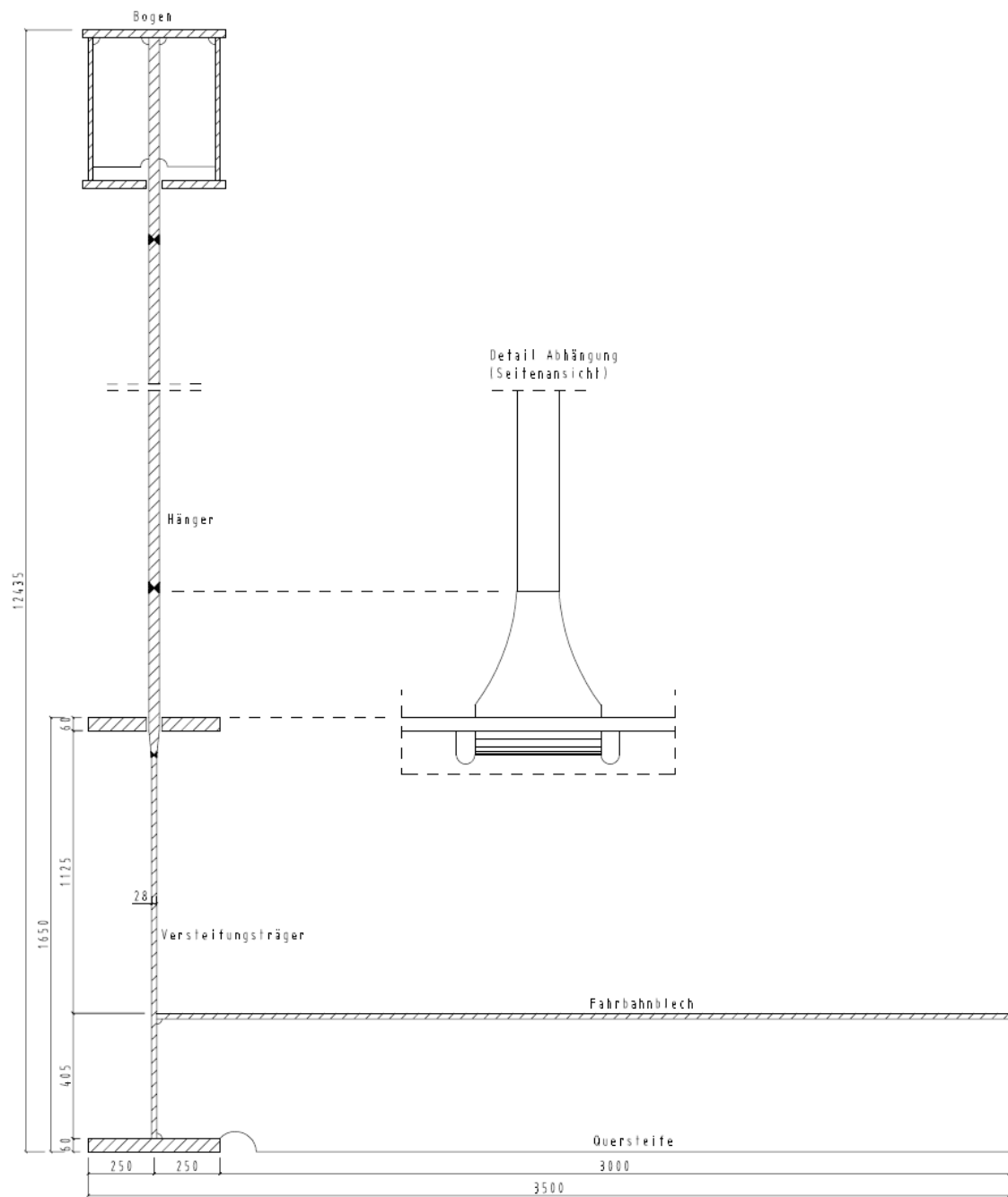


Abbildung 45: Schnitt in Brückenmitte

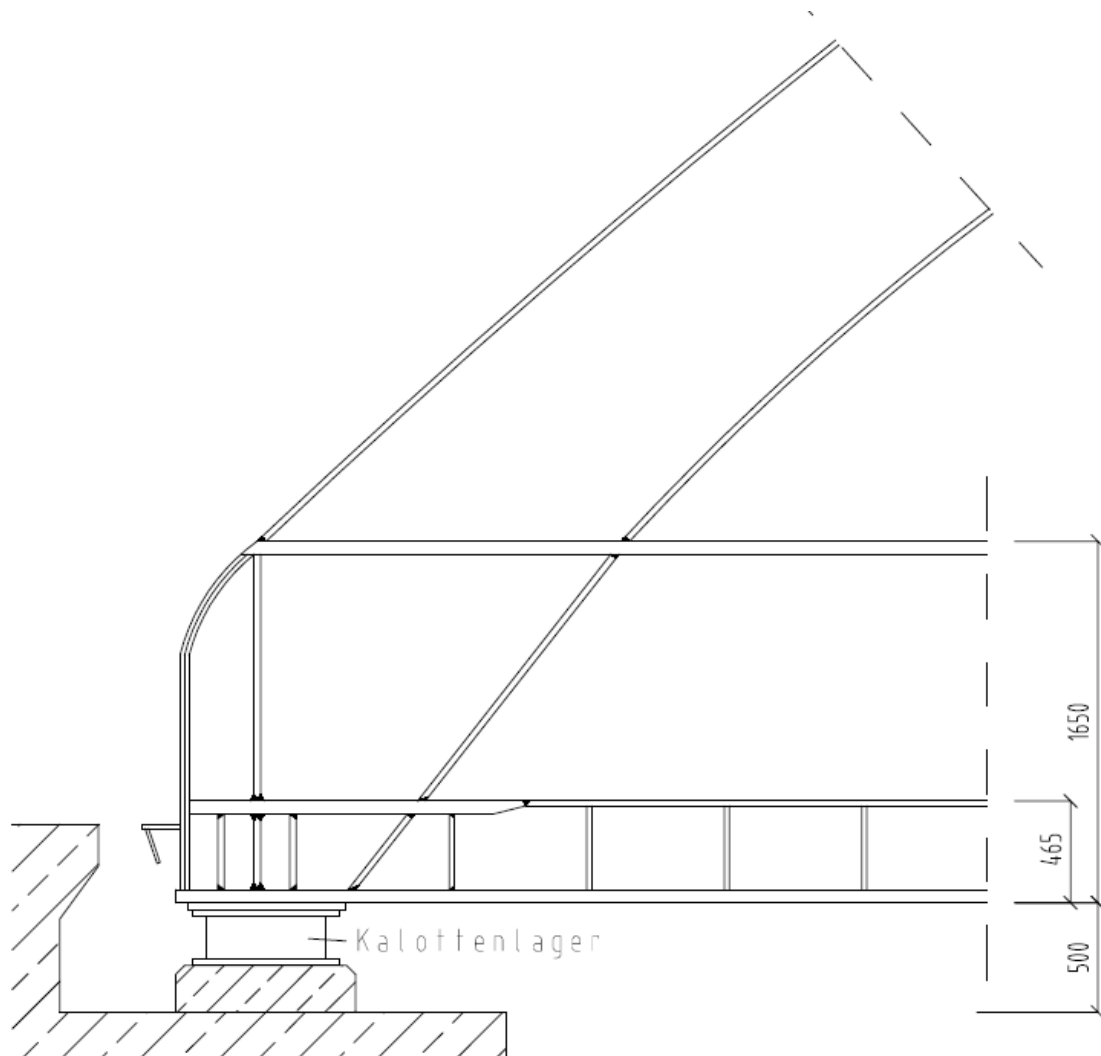


Abbildung 46: Detail Brückenfußpunkt

3.2 Vershubkonzept

Um den Vershubvorgang planmäßig und in dem vorgeschriebenen Zeitraum ausführen zu können, ist ein entsprechendes Montagekonzept zur Realisierung erforderlich. Der Einschub der beiden Stabbogenbrücken soll planmäßig im Abstand eines halben Jahres erfolgen. Dazu sind am 22.10.2010 und am 10.03.2011 zwischen 00:00 Uhr und 06:00 Uhr Sperrpausen zur vollständigen Gleissperrung vorgesehen. Für den Einschub der vollständig vormontierten Brücke stehen demzufolge nur jeweils sechs Stunden zur Verfügung. Die allgemeinen Bauarbeiten für den Streckenabschnitt beginnen bereits Mitte Dezember 2009 und sollen Anfang Mai 2011 abgeschlossen sein. In diesem Zeitraum kann die Streckenverbindung nur eingleisig befahren werden.

Basis der Überlegungen hinsichtlich der Montage sind die vorhandenen Rahmenbedingungen vor Ort. Bei den beiden bestehenden Fachwerkbrücken handelt es sich um eine dreiteilige Konstruktion. Nach der Demontage der Überbauten stehen zwei vorhandene Stützpfeiler zur Verfügung, die für den Vershubvorgang genutzt werden können. Aus dieser Überlegung heraus soll der Vershub mit Hilfe der Vershubbahn SEH und Rollwagen SEH erfolgen (siehe Kapitel 2.2). Die Vershubbahn wird dabei aus Richtung Glückstadt bis zum ersten bestehenden Pfeiler geführt (siehe Abbildung 47). Darüber hinaus wird ein weiteres kurzes Stück montiert, welches jedoch nicht waagrecht weiter verläuft, sondern unter einem geringen Winkel über ein entsprechendes Zwischenstück angepasst wird. Um den alten Pfeiler als Auflager für die Vershubbahn nutzen zu können, muss dieser teilweise abgerissen und erneuert werden. Um den zweiten bestehenden Pfeiler nicht ebenfalls erneuern zu müssen, wird die Brücke inklusive Vorbauschnabel bis zum neuen Widerlager am gegenüberliegenden Ufer geschoben. Ein 10m langer Vorbauschnabel am Brückenanfang und ein Ballastgewicht von 50t am Brückenende sind dazu nötig. Das Ballastgewicht ist erforderlich, um die Lagesicherheit während des Vershubvorgangs zu gewährleisten und es wirkt sich positiv auf den Vorbauschnabel aus, da sich so die vertikale Auflagerreaktion verringert. Zur Stabilisierung der Brücke sind zusätzliche Hängeraussteifungen vorgesehen.

Die Positionierung der Rollwagen unterhalb der Brückenkonstruktion ergibt sich aus zwei Bedingungen. Der vordere Rollwagen muss soweit eingerückt werden, damit der Vorbauschnabel das Vershublager auf der Uferseite „Itzehoe“ (Abbildung 47) erreicht, bevor sich dieser am Ende der Vershubbahn befindet. Der Abstand der beiden Wagen untereinander muss mindestens so groß sein, wie der zu verbleibende Vershubweg bis zur Endposition.

Wie bereits erwähnt, wird der Überbau im ersten Schritt soweit geschoben, bis der vordere Rollwagen über dem bestehenden Pfeiler positioniert ist und sich demzufolge der Vorbauschnabel über der Vershubstation befindet. Die Vershubstation setzt sich aus drei Komponenten zusammen, dem Vershublager, einem Kalottenlager zum Ausgleich klei-

ner Drehwinkel und einer Stellingpresse. Das Vershublager selbst besteht aus zwei gekammerten PTFE-Gleitplatten, mit darunter liegender Elastomerschicht, die in einem massiven Stahlblock eingebettet sind.

Im zweiten Schritt wird der Überbau weiter verschoben, sodass der vordere Rollwagen auf der abfallenden Vershubbahn weiterbewegt. Der Vorbauschabel läuft langsam auf die Vershubstation auf und der vordere Rollwagen setzt sich automatisch selbst frei. Der Vershub erfolgt im weiteren Verlauf demzufolge über den hinteren Rollwagen sowie stationär über das Vershublager. Die Brücke kann somit bis zur endgültigen Position verschoben werden. Um den Überbau auf dessen Endhöhe abzustapeln, wird der Vorbauschabel demontiert, die Vershubbahn sowie der alte Pfeiler auf der Seite Glückstadt entfernt und das Vershublager auf der Seite Itzehoe durch ein Brückenlager ersetzt. Abschließend dazu werden die Hängeraussteifungen entfernt und die Fahrbahnplatte der Eisenbahnüberführung wird beschottert, um darauf die Gleise verlegen zu können.

Der Einschub der zweiten Brücke wird in analoger Weise ausgeführt. Dabei soll derselbe Vorbauschabel wie bei der ersten Überführung verwendet werden. Dem Anschluss zwischen Vorbauschabel und Versteifungsträger des Überbaus gilt hier ein besonderes Augenmerk. Zum einen sollte so angeschlossen werden, dass wenig Trenn- und Schleifarbeiten an der Brücke entstehen und hinsichtlich des Korrosionsschutzes keine Beeinträchtigungen zustande kommen. Aus dieser Überlegung heraus erfolgt die Verbindung in Form geschraubter Laschenstöße. Eine schnelle Montage und Demontage ist dadurch realisierbar und der Schnabel kann problemlos wieder verwendet werden.

Zur besseren Nachvollziehbarkeit sind die einzelnen Montageschritte in den Abbildung 47 bis Abbildung 51 dargestellt und nachfolgend kurz erläutert. Abbildung 52 zeigt den Endzustand inklusive Beschotterung und verlegter Gleise.

Abbildung 47 – Ausgangszustand:

- Vershubbahn zwischen Widerlager Alt und Pfeiler 1 Alt auf der Seite Glückstadt montieren
- Vorbauschabel montieren, Hängeraussteifung einfügen, Ballastieren
- Brücke aufstapeln, um Rollwagen entsprechende der Vorgaben unterhalb des Überbaus zu positionieren
- Vershublager auf der Seite Itzehoe einrichten

Abbildung 48 – Vershubschritt 1

- Vershub der Brücke bis sich der erste Rollwagen über dem alten Pfeiler befindet

Abbildung 49 – *Vershubschritt 2*

- Weiterverschieben, sodass der vordere Rollwagen auf der schräg montierte Vershubbahn weiterläuft, somit senkt sich der Überbau samt VBS ab, bis dieser auf die Vershubstation aufläuft und sich der Rollwagen dadurch selbstständig freisetzt.

Abbildung 50 - *Vershubschritt 3*

- Vershub der Brücke mit Hilfe des hinteren Rollwagen und stationär über dem Vershublager, bis die Brücke die vorgesehene Endposition erreicht.

Abbildung 51 - *Endzustand nach dem Einschub*

- Ballastgewicht entfernen
- Vorbauschnabel demontieren, Anschweißlaschen an der Brückenkonstruktion abtrennen und verschleifen, Korrosionsschutz aufbringen
- Brücke aufstapeln
- Vershubbahn und Rollwagen auf Seite Glückstadt demontieren und Vershublager auf Seite Itzehoe entfernen
- Pfeiler Alt entfernen
- Brückenlager auf Seite Itzehoe montieren
- Brücke abstapeln
- Hängeraussteifung entfernen

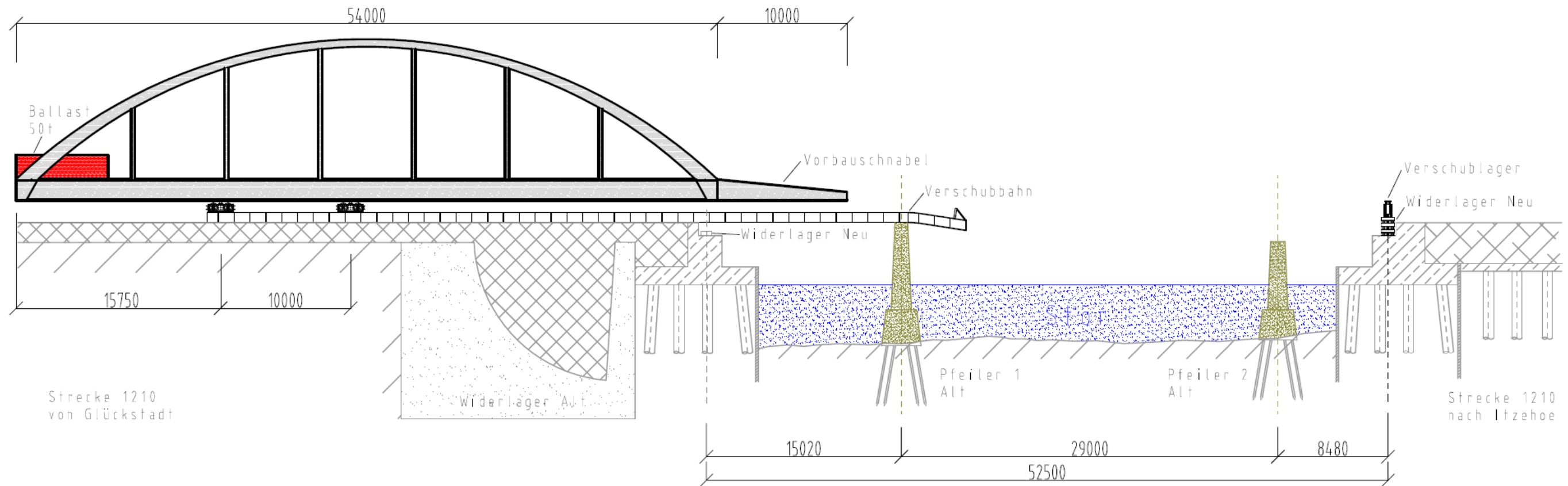


Abbildung 47: Ausgangszustand Vershub

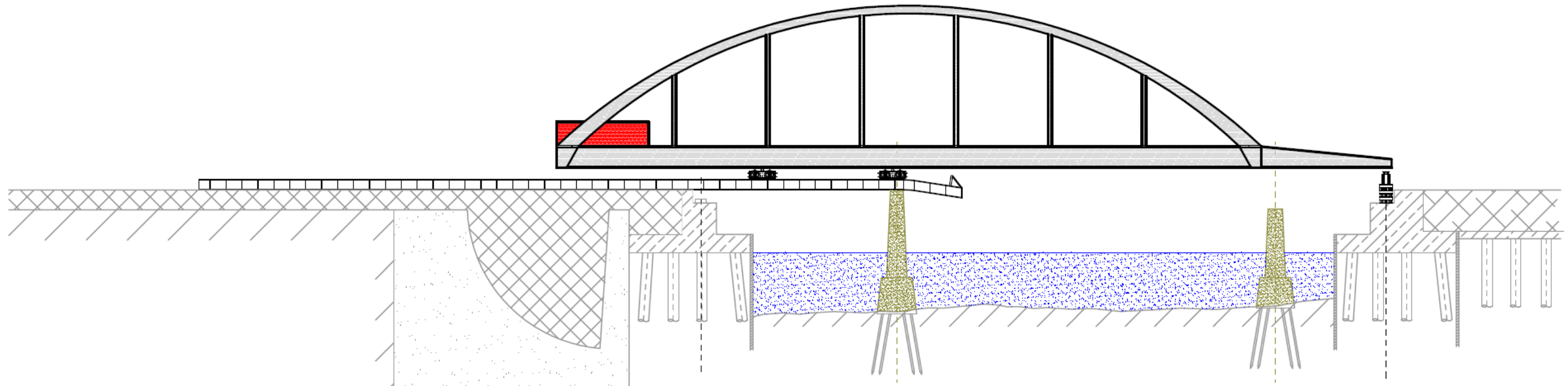


Abbildung 48: Vershubschritt 1

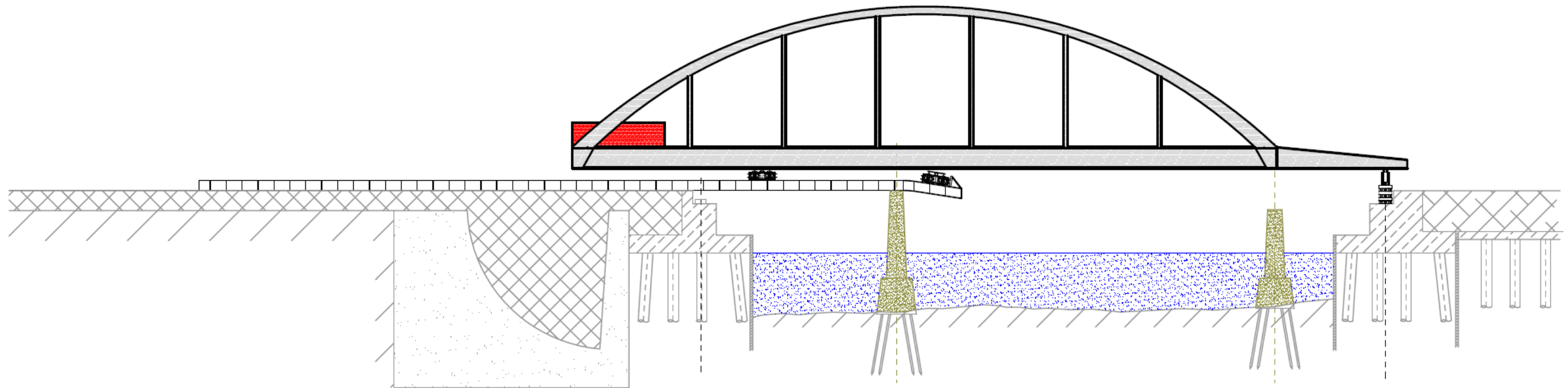


Abbildung 49: Vershubschritt 2

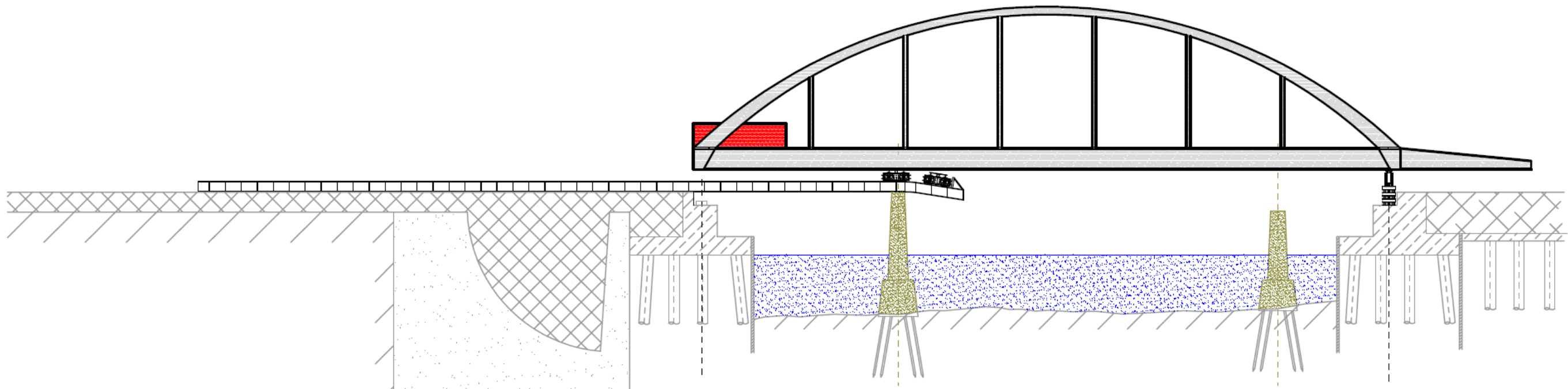


Abbildung 50: Vershubschritt 3

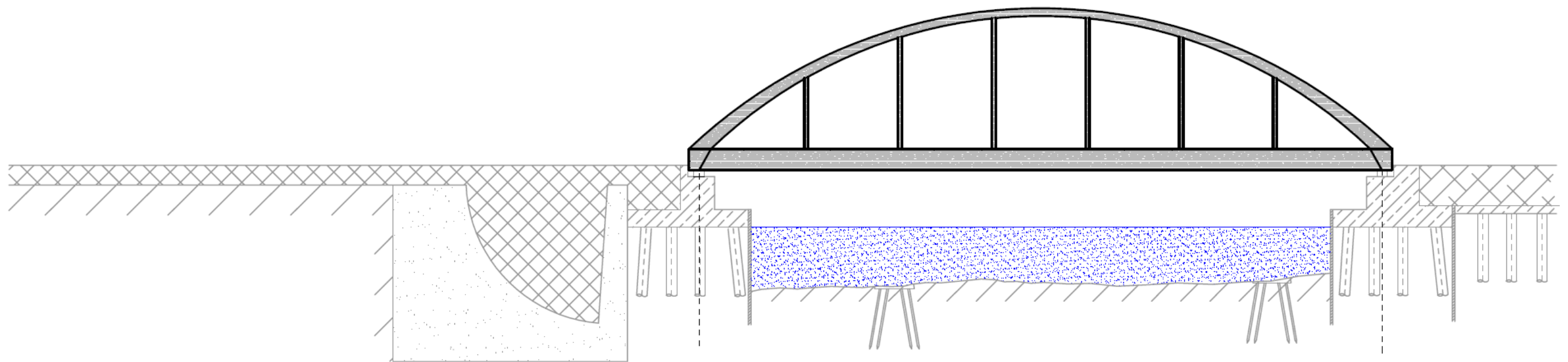


Abbildung 51: Endzustand nach erfolgreichem Einschub

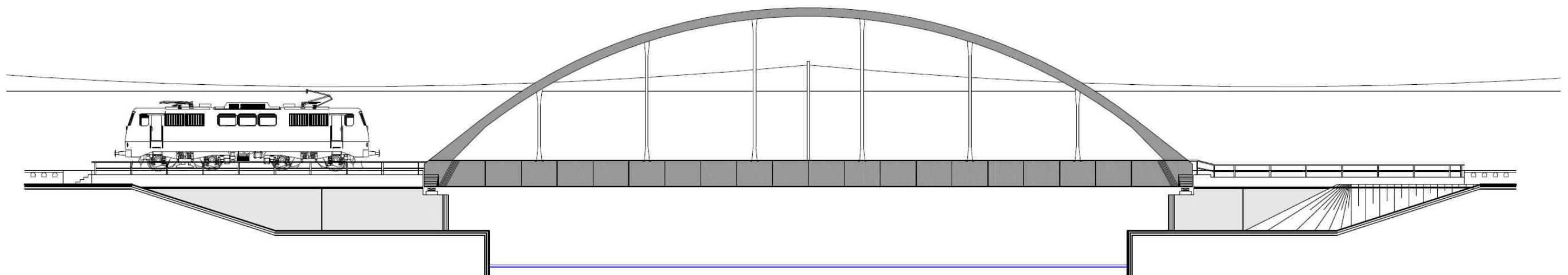


Abbildung 52: Endzustand nach Abschluss aller Baumaßnahmen

Neben dem vorgestellten Montagekonzept standen noch drei weitere Möglichkeiten zur Auswahl. Bei diesen Varianten hätte der Pfeiler 2 Alt zusätzlich genutzt werden müssen, um darauf ein stationäres Verschiebungslager zu errichten. Zwar wäre es möglich gewesen, den Vorbauschnabel kompakter zu dimensionieren und auf das Ballastgewicht von 50t zu verzichten, jedoch hätte der zweite Pfeiler entsprechend des Verschiebungs teilweise erneuert werden müssen. Der Verschiebung würde dadurch teilweise über den Brückenuntergurt erfolgen, wodurch der Korrosionsschutz nicht vollständig hätte hergestellt werden können. Aus diesen Gründen konnten sich diese Varianten bei der Festlegung des Verschiebungskonzepts nicht durchsetzen.

3.3 Variantenaufstellung der Vorbauschnabelkonstruktion

Für die Ausführung der VBS-Hauptträger steht die Möglichkeit des offenen I-förmigen Vollwandträgers, des Vierendeelträgers sowie des Fachwerkträgers zur Auswahl. Dabei wird im Rahmen dieser Diplomarbeit die Ausführung als offener Vollwandträger untersucht. Die Konstruktionsweise sieht vor, den Untergrut als Verlängerung zum Brückenuntergrut auszubilden. Die Steghöhe zwischen Schnabelspitze und VBS-Ende soll entsprechend des Schnittkraftverlaufes angepasst werden, wodurch eine hohe Auslastung der Struktur über dessen gesamte Länge erreicht werden kann. Die Kopplung zwischen den beiden Hauptträgern des Vorbauschnabels erfolgt über Koppelstangen und Verbände. Die sinnvolle Anordnung und Ausbildung dieser Verbände wird dabei ebenfalls untersucht.

Zur Aufstellung der zu untersuchenden Varianten müssen zunächst alle strukturellen Parameter aufgelistet und als Variablen beziehungsweise Konstanten definiert werden. Diese Festlegungen stammen zum einen aus konstruktiven Forderungen, zum anderen werden für diverse Parameter Abgrenzungen getroffen, um die Anzahl an Varianten in einem vertretbaren Rahmen zu halten. Im Folgenden werden die Parameter differenziert und die jeweilige Zuordnung wird erläutert.

• Konstante Parameter:

- **A:** *Steghöhe am Vorbauschnabelende* – Die Steghöhe im Anschlussbereich zwischen Vorbauschnabel und Brückenfußpunkt wird dem Versteifungsträger mit einer Gesamthöhe von 1650mm angepasst.
- **B:** *Gurtbreite am Untergrut* – Die Breite des Untergrutes ist konstruktiv der Breite des Brückenuntergruts mit 700mm anzupassen, da die seitliche Führung über den Untergrut erfolgt und daher kein Versatz zwischen Brücke und VBS entstehen darf.

- **C: Gurtbreite am Obergurt** – Diese wird mit 400mm festgelegt. Es wird dadurch ein volles Mittragen des Querschnitts unter Druckbeanspruchung auch bei den Varianten mit dünnem Obergurt gewährleisten.
- **D: Systemlänge** – Diese resultiert aus dem Verschiebungskonzept mit einer Gesamtlänge von 10000mm.
- **E: Systembreite** – Die Systembreite wird der Systembreite der Versteifungsträger des Überbaus mit 6500mm angepasst.

• Variable Parameter:

- **A: Anzahl der Verbandsebenen** – Untersucht wird der Einfluss von einer sowie von zwei Verbandsebenen auf das System sowie die Notwendigkeit einer zweiten Ebene.
- **B: Anzahl der Verbandfelder** – Aufgezeigt werden soll, welchen Einfluss eine Veränderung der Verbandsanzahl mit sich zieht und welche Anzahl an Feldern für das vorliegende Projekt am sinnvollsten erscheint. Die Untersuchung der ersten beiden Parameter und die daraus resultierenden Festlegungen bilden die Basis für die Berechnungen und Nachweise der Hauptträgerstruktur.
- **C: Dicke Stegblech** – Um den Einfluss der Stegblechdicke auf das System aufzuzeigen, werden die Dicken 22mm, 15mm, 12mm, 10mm und 8mm in S235 gegenübergestellt, bei S355 entfällt die Stegdicke 22mm.
- **D: Dicke Obergurt** – Für den Obergurt bilden die Blechdicken 35mm, 30mm, 25mm, 20mm und 15mm in S235 die Auswahl, für S355 entfällt das 35mm Blech.
- **E: Dicke Untergurt** – Bei den Untergurtdicken werden 30mm, 25mm, 20mm und 15mm untersucht.
- **F: Stahlsorte** – Bei der Auswahl der Stahlsorte soll sich auf allgemeine Baustähle der Festigkeitsklasse S235 und S355 beschränkt werden.
- **G: Steghöhe an der Schnabelspitze** – Die Steghöhe an der Schnabelspitze richtet sich nach der Anzahl der Verbandfelder. Bei einer Verbandsebene resultiert die erforderliche Höhe aus der Auslastung infolge der Spannungen. Bei zwei Verbandsebenen muss aufgrund der konstruktiven Ausbildung der Verbände eine Höhe von 450mm eingehalten werden.

Um zu verstehen, warum sich bei der Variantenuntersuchung lediglich auf offenen Vollwandträger beschränkt wird, soll kurz auf die beiden alternativen Ausführungsarten eingegangen werden. Aufgrund der speziellen Gegebenheiten des Projektes EÜ Stör hinsichtlich der konstruktiven Ausbildung der VBS-Hauptträger sowie der Anschlussmöglichkeiten am Brückenfußpunkt sind folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

Ausführung der Hauptträger als Fachwerk:

Aufgrund der geringen Anschlusshöhe von nur 1,65m bei einer Länge von 10m müsste das Fachwerk gedrungen ausgebildet werden, wodurch große Normalkräfte in den einzelnen Stäben entstehen. Dies führt insbesondere bei dem auf Druckkraft und damit Stabilitätsgefährdeten Stäben, beispielsweise dem Fachwerkobergurt, zu großen Profilen. Zudem müsste planmäßig eine Verbandebene am Obergurt vorgesehen werden, um die Knicklänge zu reduzieren und nicht unwirtschaftliche Profilgrößen zu erhalten. Am Untergurt ist zu berücksichtigen, dass dieser aufgrund der Einwirkungen infolge vertikaler Auflagerreaktion sowie Kraft aus Seitenführung auf Doppelbiegung beansprucht wird. In Verbindung mit den wirkenden Normalkräften müsste ein entsprechend steifes Profil der Reihe HEB oder sogar HEM verwendet werden. In der Summe führen diese großen Profilgrößen und die geringe Fachwerkhöhe bei dreieckförmiger Ausbildung zu Problemen bei der Ausbildung der Knotenpunkte, da so im vorderen Drittel des VBS eine Art Vollwandstruktur entsteht. Eine parallelgurtige Ausführung könnte das Anschlussproblem zwar lösen, jedoch führt dies zu erhöhtem Stahlverbrauch. Weiterhin gestaltet sich der Anschlussbereich zwischen VBS und Brückenfußpunkt über die geschraubten Laschenstöße als schwierig. Auf die Möglichkeiten zum Anschluss an den Brückenfußpunkt wird im folgenden Kapitel genauer eingegangen.

Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass Standard Walzprofile eine Breite von 300mm nicht überschreiten. Da der Untergurt jedoch in seiner Breite an den Brückenfußpunkt mit 700mm aufgrund der seitlichen Führung angepasst werden soll, müssten zusätzliche Verbreiterungen angeschweißt werden, was zu einem erhöhten Fertigungsaufwand führt. In der Summe erscheint diese Ausführungsart für das vorliegende Projekt daher als wenig sinnvoll.

Ausführung der Hauptträger als Vierendeelträger:

Bei den Vierendeelträgern handelt es sich um vollwandige Profile mit Stegausschnitten. Der Vorteil bei dieser Ausführung liegt in der Gewichtsersparnis, welche durch die Ausschnitte erreicht werden kann. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass aufgrund des Verschiebvorgangs die Stelle der Einwirkung veränderlich ist. Somit würde zwangsläufig die Einwirkung bei einem bestimmten Verschiebschritt mittig eines Ausschnitts wirken. Auf-

grund der reduzierten Steifigkeit an dieser Stelle ist entweder das Stegblech in einer entsprechenden Dicke zu wählen, was jedoch die Gewichtsersparnis der Ausschnitte überflüssig macht, oder bei dünnen Stegen müsste aufwendige Aussteifungsmaßnahmen für die einzelnen Ausschnitten ausgeführt werden, was die Fertigungskosten stark in die Höhe treibt. Diese Ausführungsart erscheint als keine sinnvolle Alternative und wird nicht weiter verfolgt.

3.4 Konstruktive Grundsätze

In diesem Abschnitt wird auf die konstruktiven Grundsätze der Ausführung eingegangen. Wie bereits bei der Variantenaufstellung erwähnt, ist die Untergurtbreite des Vorbauschnabels der des Brückenfußpunkts anzupassen, damit kein Versatz für die Seitenführung entsteht. Da der Untergurt des Überbaus am Lagersockel im Endbereich des Brückenfußpunktes von 500mm auf 700mm verbreitert wird, ist der Vorbauschnabeluntergurt ebenfalls mit 700mm auszuführen.

Als allgemeine Anschlussmöglichkeiten am Brückenfußpunkt stehen der Ober- und Untergurt, der Steg sowie das Fahrbahnblech zur Verfügung. Die Forderung der Deutschen Bahn verlangt, dass angeschweißte oder angeschraubte Montagehilfen sowie Hilfskonstruktion vollständig abgetrennt und verschliffen werden, sodass keine sichtbaren Stellen verbleiben. Dies hat zur Folge, dass angeschweißte Laschen etc. sauber abgetrennt und verschliffen werden müssen und keine zusätzlichen Bohrungen in der Konstruktion selbst verbleiben sollten. Diese Forderung führt zu der Überlegung, seitlich an die Gurte Laschen anzuschweißen, um daran die Schraubstöße anzubringen. Am Obergurt ist dies ohne Einschränkungen denkbar, am Untergurt hingegen ist diese Verbreiterung nicht möglich, da ansonsten das Seitenführungslager behindert wird. Die Zuglasche wird daher nicht am Untergurt, sondern am Fahrbahnblech befestigt. Dazu ist es erforderlich, den Fahrbahnübergang im unmittelbaren Anschlussbereich auszuklinken und diese Stellen nachträglich einzuschweißen. Die Abtragung der Querkraft erfolgt über geschraubte Laschenstöße am Steg. Zu diesem Zweck wird dieser planmäßig um 200mm über das Ende hinaus verlängert, um geeignete Anschlussmöglichkeiten zu schaffen.

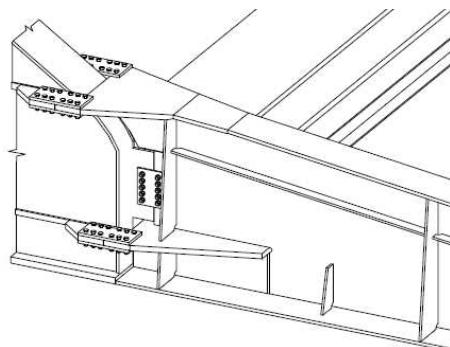


Abbildung 53: Anschluss VBS an Brückenfußpunkt

4 Grundlagen der Nachweisführung

4.1 Allgemeines

In diesem Kapitel sollen die Grundlagen für die Lastannahmen und für die Nachweisführung per Hand- und FEM-Berechnung zugrunde gelegt werden. Speziell wird dabei auf die Forderungen der entsprechenden Normen eingegangen, worin die Lastannahmen und die zu erbringenden statischen Nachweise definiert sind. Weiterhin wird auf die Ein- und Ausgabeparameter der FE-Analyse eingegangen.

4.2 Grundlagen der Einwirkungen

Um die Belastungen, welche auf den Vorbauschnabel angesetzt werden müssen, zu definieren, wird ein geeignetes statisches Modell der Brücke im maßgebenden Montageschritt mit entsprechenden Einwirkungen versehen, um die Auflagerreaktionen zu ermitteln. Diese Lagerreaktionen werden dann als Einwirkungen auf den VBS aufgebracht und damit die statischen Nachweise geführt. Maßgebend sind dabei die Zustände, bei denen der Vorbauschnabel über das Verschlusslager geführt wird. Die Rollwagen sowie die Verschlusslager werden im Modell als Auflagerpunkte definiert. Die Freiheitsgrade sind so gewählt, dass ein statisch bestimmtes System entsteht.

Um zu berücksichtigen, dass es sich während des Verschlusses um eine bewegliche Einwirkung mit veränderlicher Größe handelt, werden zwei statische Systeme herangezogen. Im ersten Modell (Abbildung 54) befindet sich das Auflager an der Schnabelspitze, im zweiten Modell (Abbildung 55) am Übergang zwischen Vorbauschnabel und Brückenfußpunkt. Somit ergeben sich für die Auflagerreaktionen ein maximaler und ein minimaler Wert. Zur Bestimmung der Lagerreaktion an einer beliebigen Stelle am Schnabel können diese Werte linear interpoliert werden. Die Freiheitsgrade sind der Abbildung 56 zu entnehmen.

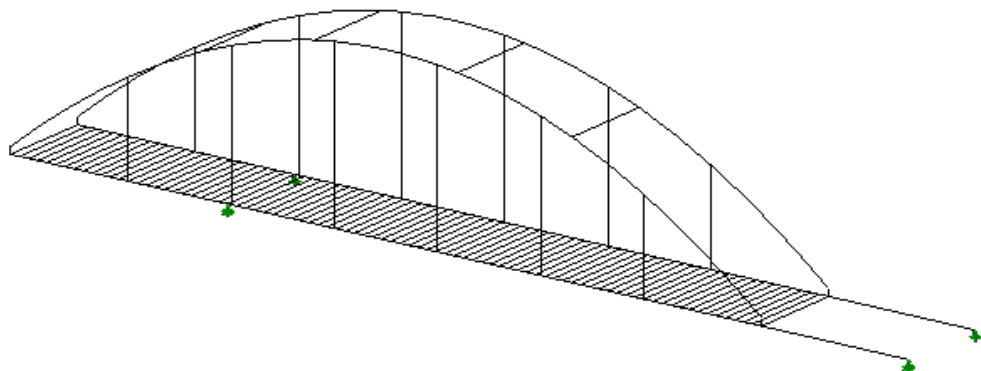


Abbildung 54: Statisches System zur Bestimmung der Lagerreaktion, Fall 1

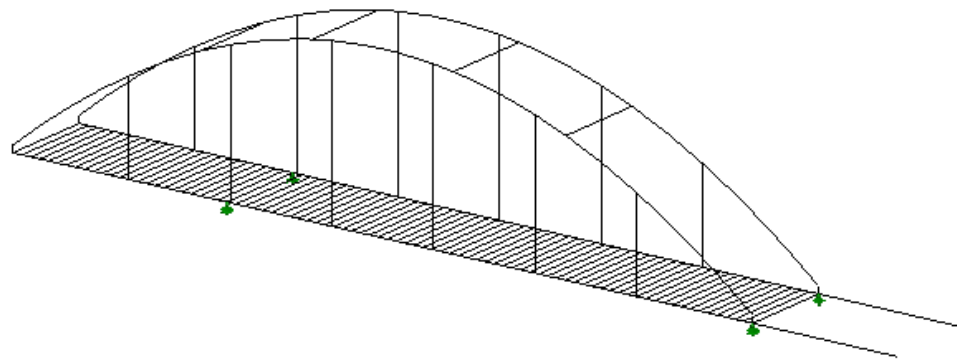


Abbildung 55: Statisches System zur Bestimmung der Lagerreaktion, Fall 2

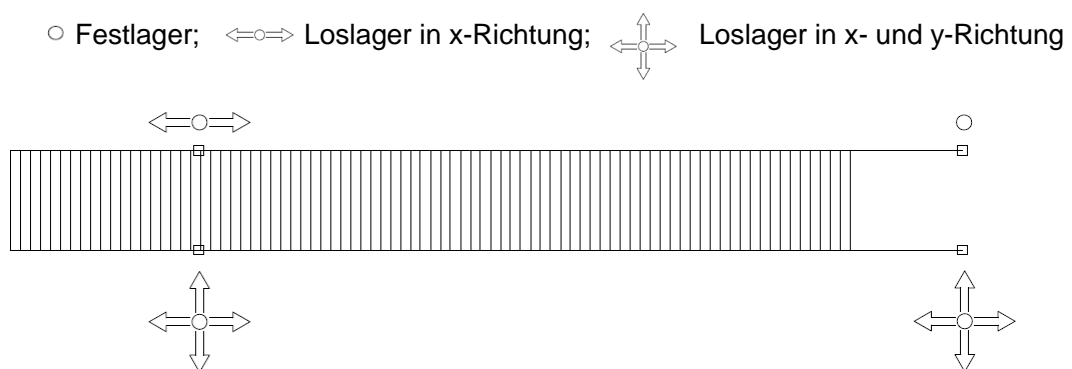


Abbildung 56: Definition der Freiheitsgrade der Auflager

Die Einwirkungen, die auf das statische Modell angesetzt werden, sind Normen mit den entsprechenden normativen Verweisungen entnommen wurden. Grundsätzlich erfolgt die Lastannahme nach DIN 1055 Teil 8 – Einwirkungen während der Bauausführung [6]. In dieser Norm werden die Einwirkungen, die speziell bei Bauzuständen auftreten, geregelt. Weiterhin wird die Nenndauer für vorübergehende Bemessungssituationen klassifiziert. Unterschieden wird dabei für die Dauer von 3 Tagen, 3 Monaten und einem Jahr. Dies hat Einfluss auf die Größe der anzusetzenden Einwirkungen, insbesondere bei klimatischen Ereignissen, wie beispielsweise Wind- und Schneelasten, ist eine Verringerung möglich, was rechnerisch in Form von Abminderungsfaktoren berücksichtigt wird. Für den Verschubvorgang der Eisenbahnüberführung Stör sind 6 Stunden vorgesehen, demzufolge werden die Lasten unter der Berücksichtigung der Dauer innerhalb von 3 Tagen ermittelt. Nachfolgend werden die Einwirkungen im Einzelnen beschrieben und dargelegt.

Zunächst werden die ständig wirkenden Lasten betrachtet. Dazu zählen Eigengewicht der Brücke und des Vorbauschnebels, sowie das Ballastiergewicht von 50t zur Sicherstellung der Lagesicherheit und Hängeraussteifung. In ihrer Wirkung bilden diese Lasten die vertikalen Auflagerreaktionen. Das Eigengewicht des Vorbauschnebels ist jedoch abhängig von der jeweiligen Variante. Um die Anzahl der Lastfälle in diesem Zusammenhang zu

reduzieren, werden die Varianten, die sich im Eigengewicht nicht mehr als 0,5 kN/m unterscheiden, zu einem Lastfall zusammengefasst. Dies ist nur möglich, weil die Lagerreaktionen maßgeblich vom Eigengewicht der Brücke mit rund 270t im Gegensatz zum Vorbauschnabel mit rund 8,5t bis 11t stammen.

Als veränderliche Einwirkungen sind Windlasten und Lasten aus Baustellenverkehr zu berücksichtigen. Schnee- und Eislasten bleiben unberücksichtigt, da bei derartigen Witterungsbedingungen entweder von einem Verschub abgesehen wird oder durch geeignete Maßnahmen eine komplette Schnee- und Eisfreiheit sichergestellt wird.

Die Windeinwirkungen sind laut DIN 1055-8 [6], für Brückenbauwerke dem DIN Fachbericht 101 Anhang N [7] zu entnehmen. Der Standort Itzehoe liegt nördlich von Hamburg rund 10km landeinwärts der Küste und fällt daher in die Windlastzone 3 (Binnenland). Jedoch muss beachtet werden, dass die im DIN Fachbericht geregelten Windlasten nur für das Fahrbahndeck gelten. Für Einwirkungen auf Bögen und Hänger wird auf die DIN 1055 Teil 4 – Windlasten [5] verwiesen. Hierbei entsteht jedoch ein Widerspruch in den Abminderungsfaktoren für vorübergehende Einwirkungen. Im DIN Fachbericht wird von einer Einwirkungsdauer innerhalb eines Tages mit einer Abminderung auf 40% ausgegangen, jedoch muss dabei sichergestellt sein, dass keine größere Windgeschwindigkeit als 18 m/s auftritt. In der DIN 1055 Teil 4 hingegen ist die Dauer bis zu 3 Tagen mit einer Abminderung auf 20% mit verstärkten Sicherungsmaßnahmen vorgesehen. Auf der sicheren Seite liegend werden die Windlast daher für alle Bauteile mit dem Faktor 0,4 multipliziert. Die Windlasten für den Vorbauschnabel werden entsprechend dem DIN Fachbericht 101 analog zum Fahrbahnträger der Brückenkonstruktion entnommen.

Als weitere veränderliche Einwirkung sind Verkehrslasten infolge Baustellenpersonal sowie Lasten aus Ausrüstungsgegenständen zu berücksichtigen. Dies ist in DIN 1055 Teil 8 Abschnitt 6.10 geregelt. Die Lasten von 1kN/m² für Baustellenpersonal mit geringer Ausrüstung sind dabei an der ungünstigsten Stelle anzusetzen. Die Last wird daher auf einer Breite von 1,5m je Versteifungsträger angesetzt.

Als Einwirkungen in Richtung der Brückenlängsachse (x-Achse) ist die Reibung zwischen Verschublager und Vorbauschnabel zu berücksichtigen. Als Gleitpaarung wird das Verschublager aus PTFE, sowie der Untergurt des Vorbauschnabels mit einer Zinkphosphatbeschichtung und Gleitmittel zugrunde gelegt. Die Einwirkung infolge Reibung wird mit 5% der vertikalen Auflagerlast in Rechnung gestellt.

In ihrer Wirkung ergeben sich somit für die Bemessung des Vorbauschnabels in allen drei Hauptachsen Lasten mit veränderlicher Größe in Abhängigkeit der Laststellung. Dabei

wirkt die horizontale Lagerreaktion aus Seitenführungskraft jeweils nur an einem der beiden Hauptträger des VBS, da jeweils nur an einer Seite geführt werden kann.

Die ermittelten Lasten werden im Kapitel 5.2 für die beiden Laststellungen tabellarisch aufgelistet. Die erste Laststellung bei $x=0\text{m}$ (Schnabelspitze) und die zweite Stellung bei $x=10\text{m}$ (Übergang VBS-Brückenfußpunkt) erfassen jeweils die maximal und minimal auftretenden Lagerreaktionen. Für Laststellungen an einem beliebigen Punkt können die Werte linear interpoliert werden. Somit ist eine vollständige Erfassung der Auflagerreaktionen und damit der Einwirkungen gewährleistet.

4.3 Grundlagen der Schnittkraftermittlung

Zur Ermittlung der Schnittkräfte muss zwischen den Nachweismethoden unterschieden werden. Zum einen werden die Varianten mittels „Handrechnung“, zum anderen mittels Finite Elemente Methode (FEM) nachgewiesen. In beiden Fällen erfolgt die Schnittkraftermittlung nach Theorie II.Ordnung. Die entsprechenden Imperfektionen in Form von Vorkrümmungen werden im Stabwerksprogramm ermittelt.

Zur Ermittlung der Schnittkräfte für die Handrechnung wird das Stabwerksprogramm RSTAB 5 [28] der Firma Dlubal verwendet. Hierbei wird das System zerlegt und die Schnittkräfte für den Hauptträger getrennt von den Verbänden ermittelt, da eine Erfassung der Gesamtstruktur in einem Modell nur schlecht möglich ist. Demzufolge werden für den Hauptträger nur die vertikalen Lagerreaktionen und die Lasten infolge Reibung berücksichtigt. Die horizontale Seitenführungskraft wird lediglich auf die Verbandsfelder angesetzt.

Für die zweite Nachweismethode mit Hilfe von FEM wird der gesamte Vorbauschnabel inklusive Anschluss an den Brückenfußpunkt modelliert. Somit wird die Gesamtstruktur mit den entsprechenden Steifigkeiten in einem Modell erfasst. Zu diesem Zweck wird die Software RFEM 4 [29] der Firma Dlubal verwendet. Darauf basierend kommen die Zusatzmodule RF-MAT-NL [31] sowie RF-STABIL [30] zur Anwendung.

Für die Eingabe des Modells muss berücksichtigt werden, dass die Hauptträger nicht als Stab, sondern als Einzelflächen modelliert werden. Demzufolge ist die Ausgabe von Schnittkräften in Form von Normalkräften, Querkräften und Biegemomenten so nicht möglich, da die Biegemomente und Querkräfte in Form von Normalkräften in Abhängigkeit ihrer Wirkungsrichtung bezogen auf das lokalen Achsensystem der Einzelflächen ermittelt werden. Lediglich die Ausgabe der Schnittkräfte in den Verbänden ist analog zur Handrechnungsmethode möglich.

4.4 Grundlagen der FEM – Modellierung

In diesem Abschnitt soll insbesondere auf die Modellierungsparameter im FE-Programm eingegangen werden, da diese das Ergebnis in erheblichem Maße beeinflussen können. Wie bereits erwähnt, wird die Struktur der Hauptträger aus Einzelflächen generiert. Dabei können insbesondere die Anschlussbereiche detailliert abgebildet werden. Um die Steifigkeit in der Verbindung zwischen Vorbauschnabel und Brückenfußpunkt zu erfassen, besteht entweder die Möglichkeit die Knotenlager direkt am VBS unter Berücksichtigung von Weg- und Drehfedern anzusetzen, oder einen Teil des Brückenfußpunktes mit zu modellieren und die Verbindung über die Laschen abzubilden. Somit weist der Anschlussbereich eine gewisse Steifigkeit bei gleichzeitiger Nachgiebigkeit auf. Zur Definition der Knotenlager ist die konstruktive Ausbildung des Anschlusses zu berücksichtigen. Die Anschlüsse zwischen Vorbauschnabel und Brücke erfolgen komplett über geschraubte Laschenstöße. Demzufolge übertragen die Gurte die Normalkräfte und Biegemomente, der Steg die Querkräfte. Aus dieser Forderung heraus müssen die Knotenlager der Gurte in Richtung der z-Achse frei verschieblich sein, um sich nicht an der Kraftübertragung der Querkraft zu beteiligen. Dementsprechend wird das Knotenlager am Steg in Richtung der x- und y-Achse frei verschieblich gelagert, um sich nicht an der Übertragung der Normalkräfte und Biegemomente zu beteiligen.

Zur Definition der Verbandsfelder in Form eines K-Verbandes muss zwischen einer und zwei Verbandsebenen unterschieden werden, da bei der Ausbildung von zwei Ebenen alle Stäbe als Fachwerkstäbe definiert werden können, bei einer Ebene hingegen sind die Koppelstangen als Balken zu definieren, da ansonsten das System instabil werden würde. Bei der Ausbildung als Kreuzverband werden die Koppelstangen als Fachwerkstab und die Diagonalen aus Zugstab definiert.

Um Spannungsspitzen an den Stellen der Lasteinwirkung zu minimieren, werden diese nicht als Punktlasten, sondern als Linien-, beziehungsweise als Flächenlasten entsprechend der Größe des Verschublagere mit 420mm x 160mm, sowie der seitlichen Führung mit 300mm Breite, definiert.

Die Beschreibung von Netzgrößeneinstellungen etc. erfolgt im Kapitel 4.5.2. Abbildung 57 zeigt das verwendete FE-Modell. Konstruktive Änderungen, wie beispielsweise die Berücksichtigung zusätzliche Quer- und Längssteifen, wurden stets am gleichen Modell durchgeführt.

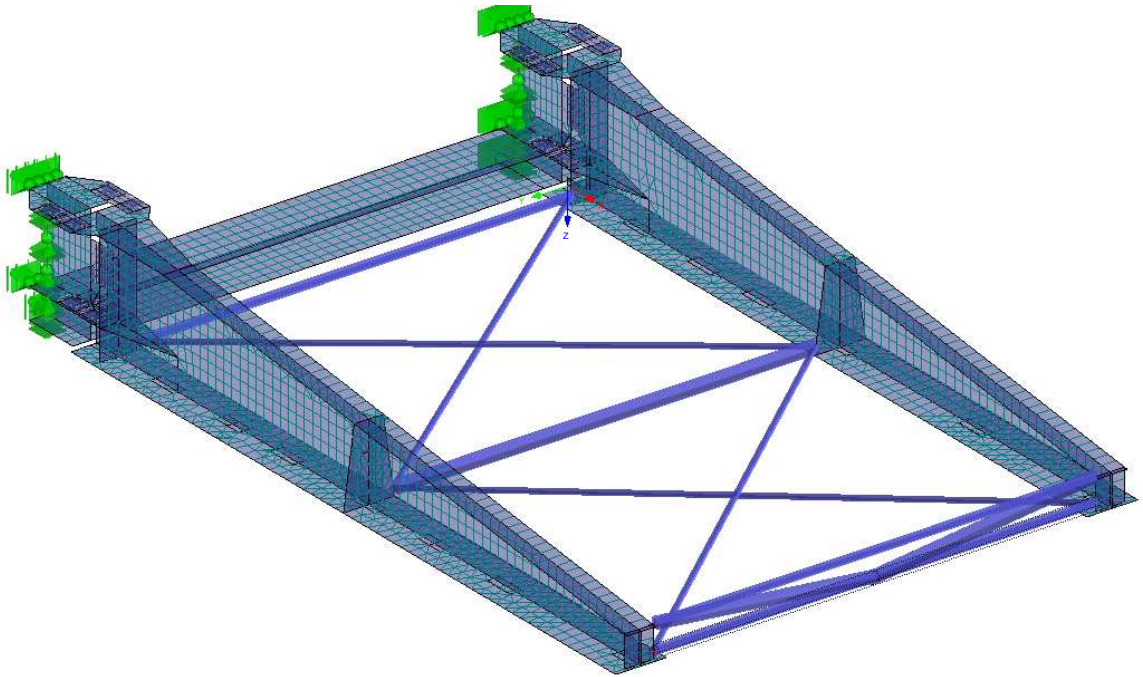


Abbildung 57: FEM Modell

4.5 Grundlagen der Nachweisführung

4.5.1 Nachweisführung mittels analytischer Berechnung

Um die statische Nachweisführung im Kapitel 6 führen zu können, werden in diesem Abschnitt die Grundlagen dafür geschaffen. Anhand von Struktogrammen werden für die Einzelnachweise die Abläufe übersichtlich und nachvollziehbar dargelegt.

Grundlegend kommt bei der Nachweisführung per Handrechnung die Normenreihe DIN 18800 ([1], [2], [3]) zur Anwendung. Die Verwendung des DIN Fachberichtes 103 [8] ist zwar ebenso denkbar, jedoch sind in dieser Norm keine spezielleren Nachweise bezüglich des Vorbauschabels gefordert. Weiterhin basiert dieser auf dem Eurocode 3 (DIN EN 1993-1-1), worauf in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden soll. Unterschiede in den Ergebnissen würden lediglich durch die verschiedenen Bemessungskonzepte der beiden Normen entstehen, nicht jedoch durch die Art der zu erbringenden Nachweise.

Im Folgenden werden die für den Vorbauschabel bemessungsrelevanten Nachweise mit Bezug auf die entsprechenden Normen tabellarisch aufgelistet, um einen ersten Überblick zu geben. Anschließend dazu werden Anmerkungen und Festlegungen zu den einzelnen Nachweisen zusammengestellt.

Art des Nachweises	Anzuwendende Norm	zugehöriges Element zum genannten Nachweis
Überprüfung b/t - Verhältnisse	DIN 18800 Teil 1 [1]	745
Allgemeiner Spannungsnachweis	DIN 18800 Teil 1 [1]	746 – 748
NW konzentrierter Lasteinleitung	DIN 18800 Teil 1 [1]	744
Beulsicherheitsnachweis	DIN 18800 Teil 3 [3]	501, 502, 503, 602, 603,
Biegedrillknicknachweis	DIN 18800 Teil 2 [2]	305, 311, 312
Nachweis der Anschlüsse (Schweißnähte, Schraubverbindungen)	DIN 18800 Teil 1 [1]	805, 807, 816, 820, 825, 826, 829

Tabelle 1: Normative Grundlagen der statischen Nachweisführung

Mit Hilfe der b/t – Verhältnisse wird zunächst überprüft, ob alle Querschnittsteile unter Druckbeanspruchung voll mittragen. Diese Untersuchung ist sowohl für den Steg, als auch für den Druckgurt zu führen. Sind die Verhältnisse für den Steg eingehalten, so kann laut DIN 18800-3 der Beulsicherheitsnachweis entfallen, jedoch muss die Forderung nach Element 744 in DIN 18800-1 beachtet werden, da unter konzentrierter Lasteinleitung und Stegslankheiten $h/s > 60$ ein zusätzlicher Beulsicherheitsnachweis erforderlich wird.

Der allgemeine Spannungsnachweis muss an mehreren Querschnittsstellen geführt werden, sowohl an der Schnabelspitze als auch am Vorbauschabelende. Weiterhin müssen lokale Spannungen im Untergurt sowie konzentrierte Lasteinleitungen berücksichtigt wer-

den. Die Nachweise erfolgen stets nach dem Verfahren elastisch-elastisch. Dabei werden sowohl die Beanspruchung S_d , als auch die Beanspruchbarkeit R_d nach der Elastizitätstheorie ermittelt. Demzufolge werden keine plastischen Tragreserven ausgenutzt. Als Nachweiskriterium gilt: $S_d/R_d \leq 1,0$.

Die in der Tabelle 1 aufgelisteten Nachweise, speziell Stabilitätsnachweise nach DIN 18800 Teil 2 und Teil 3, können nicht bedingungslos der Norm entnommen werden, da insbesondere der konische Verlauf des Hauptträgers weitestgehend unerfasst bleibt. Somit müssen an entsprechenden Stellen Idealisierungen getroffen werden. Zunächst soll auf den Biegedrillknicknachweis genauer eingegangen werden.

Der Nachweis des Biegedrillknickens für einen Querschnitt mit veränderlicher Biegesteifigkeit ist als „reine Handrechnung“ schwierig durchführbar. Zwar ist es beispielsweise möglich, den Trägerbeiwert n für einen Voutenquerschnitt zu bestimmen, jedoch ist bei der Bestimmung der Trägheitsmomente ein definierter Querschnitt vorauszusetzen. Weiterhin findet in der Norm hinsichtlich des Biegedrillknickens keine Differenzierung für unterschiedlichen Lagerungs- und Einspannverhältnisse statt. Daher erfolgt der BDK-Nachweis als vereinfachter Nachweis des Druckgurts als Druckstab nach dem Ersatzstabverfahren. Dadurch können über den Knicklängenbeiwert β nach den Eulerschen Fällen die Einspannverhältnisse berücksichtigt werden.

Der Nachweis ausreichender Beulsicherheit des Steges erfolgt nach DIN 18800-3. Auf diesen Nachweis kann verzichtet werden, wenn die b/t -Verhältnisse eingehalten sind. Darüber hinaus gilt jedoch die Forderung nach DIN 18800-1 Element 744, sodass bei Überschreitung der Stegslankheit von $h/s > 60$ ein genauerer Nachweis zu erbringen ist.

Um die Nachweise nach DIN 18800-3 sinnvoll zu führen, werden die Abmessungen des Beulfeldes idealisiert, da in der Norm stets von Rechteckplatten mit gegengleichen Randspannungen ausgegangen wird. Zwar ist angemerkt, dass Platten, deren Geometrie von der Rechteckform abweicht, ebenfalls nachgewiesen werden können, jedoch sind keine weiteren Hinweise über festzulegende Abmessungen beschrieben. Aus diesem Grund, wird die in der Abbildung 58 ersichtliche Abmessungsdefinition für den Nachweis der Teil- und Gesamtfelder als Berechnungsgrundlage formuliert. Über folgende Gleichung kann die idealisierte Beulfeldhöhe ermittelt werden:

$$h_{\text{Beulfeld}} = h_{\text{max}} - \left(\left(\frac{1}{3} \right) \cdot (h_{\text{max}} - h_{\text{min}}) \right)$$

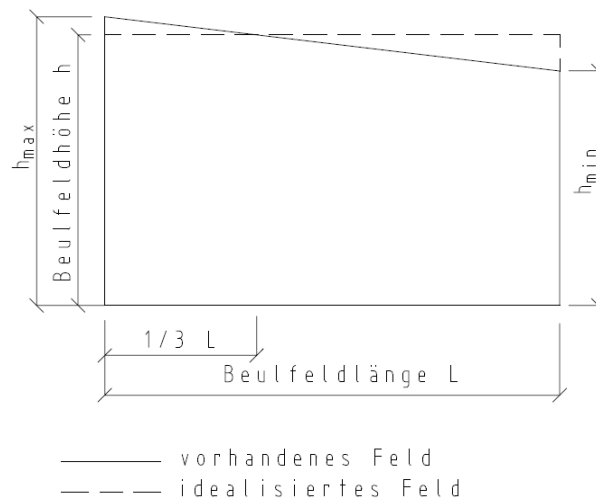


Abbildung 58: Idealisierung der Beulfeldhöhe zum Nachweis der Beulsicherheit

Die Beulfeldlänge L ist dabei bezogen auf die Länge des Gesamtfeldes oder des zu untersuchenden Teilfeldes.

Um die aus der konzentrierten Lasteinleitung erzeugte Spannung σ_y sinnvoll zu erfassen, sind hier ebenfalls Bedingungen zu formulieren. Zunächst muss berücksichtigt werden, dass es sich bei σ_y um eine lokale Spannung handelt, die demzufolge in ihrer Ausbreitung begrenzt ist. Rechnerisch ist dies nach DIN 18800-3 nicht berücksichtigt, sodass die Spannung σ_y über die gesamte Länge angesetzt werden muss. Daher wird zusätzlich Schneider „Bautabellen für Ingenieure“ [13] Seite 8.105 – Seite 8.106 sowie Petersen „Stahlbau“ [14] S. 893 zur Bestimmung des Beulwertes k hinzugezogen. Somit wird die Einwirkungslänge c im Verhältnis zur Beulfeldlänge a über den Beiwert β rechnerisch berücksichtigt. Bei der Nachweisführung muss beachtet werden, dass die Spannung σ_y aus konzentrierter Lasteinleitung nur dann zu berücksichtigen ist, wenn die Laststellung im betrachteten Teil- oder Gesamtfeld liegt.

Bei der Bestimmung der Größe der Normalspannungen σ_x können diese an der Stelle $b/2$ vom Beulfeldrand nach DIN 18800-3 (404) ermittelt werden, wenn der Maximalwert der Spannung am Beulfeldrand liegt. Bei veränderlicher Schubspannung über die Beulfeldlänge ist nach DIN 18800-3 (403) der größere der Werte $0,5 \cdot \max \tau$ oder Mittelwert von τ anzusetzen.

Im Folgenden werden die zugrunde gelegten Berechnungsabläufe der einzelnen Stabilitätsnachweise in Form von Struktogrammen vorgestellt.

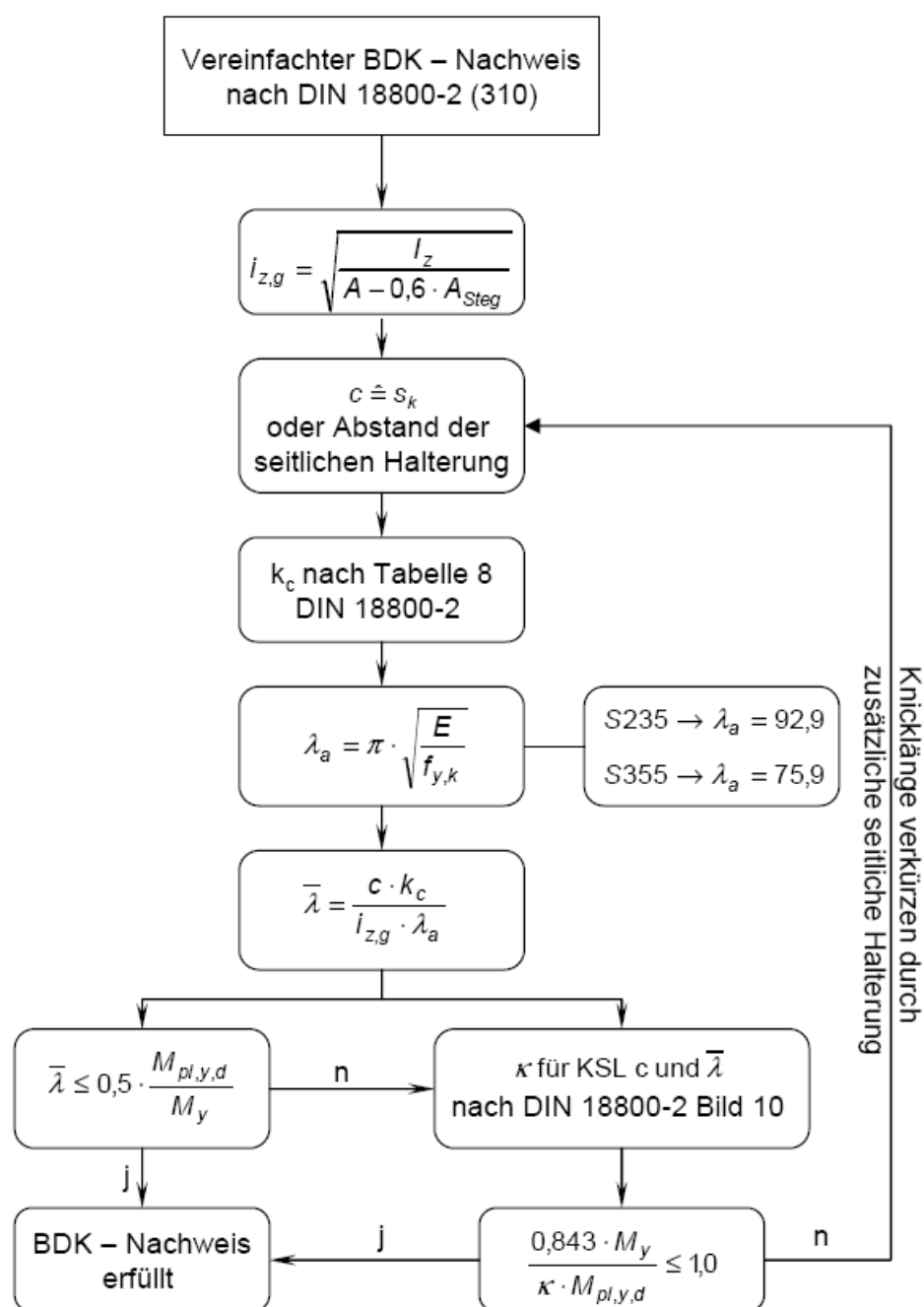
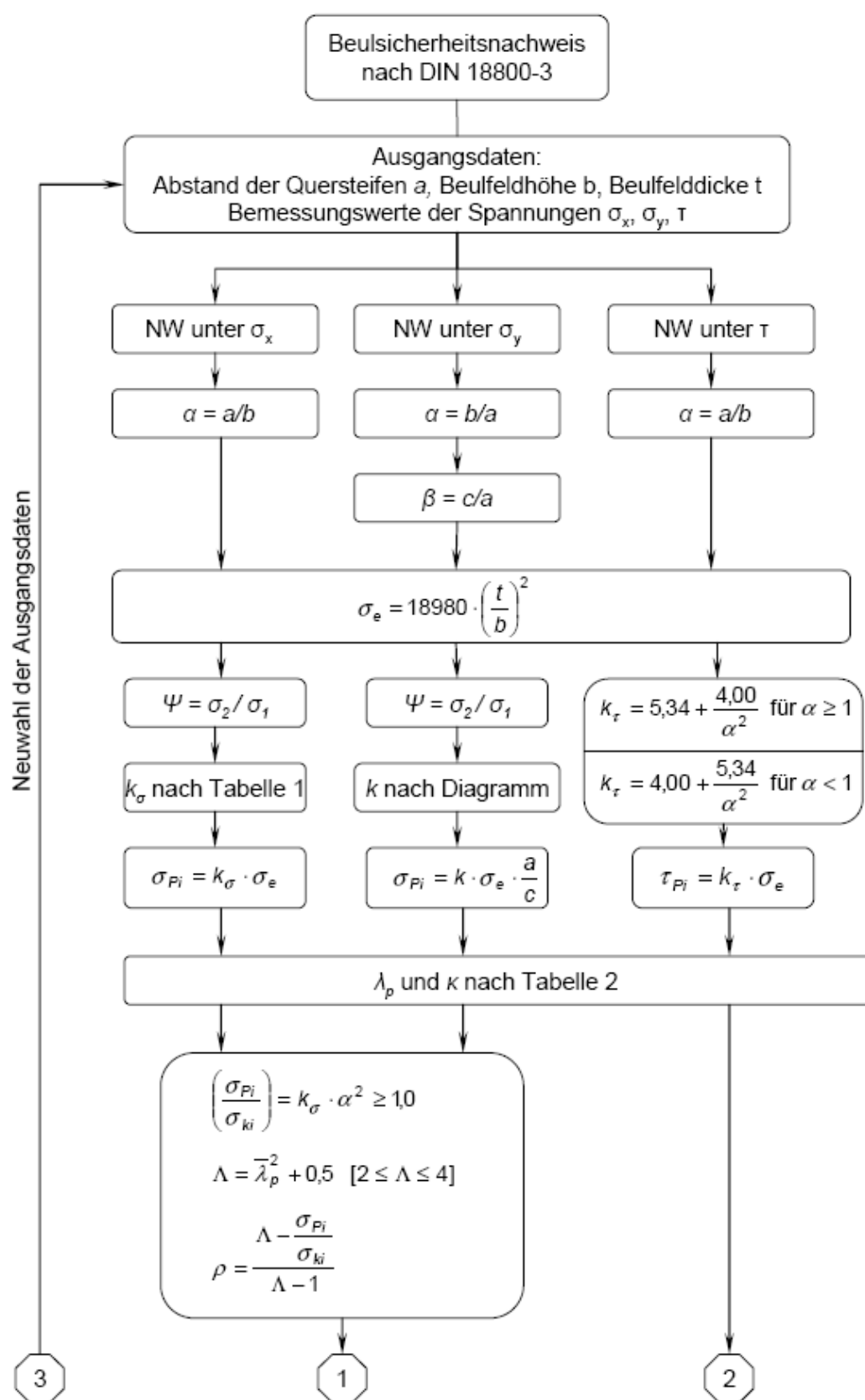


Abbildung 59: Struktogramm vereinfachter BDK-Nachweis



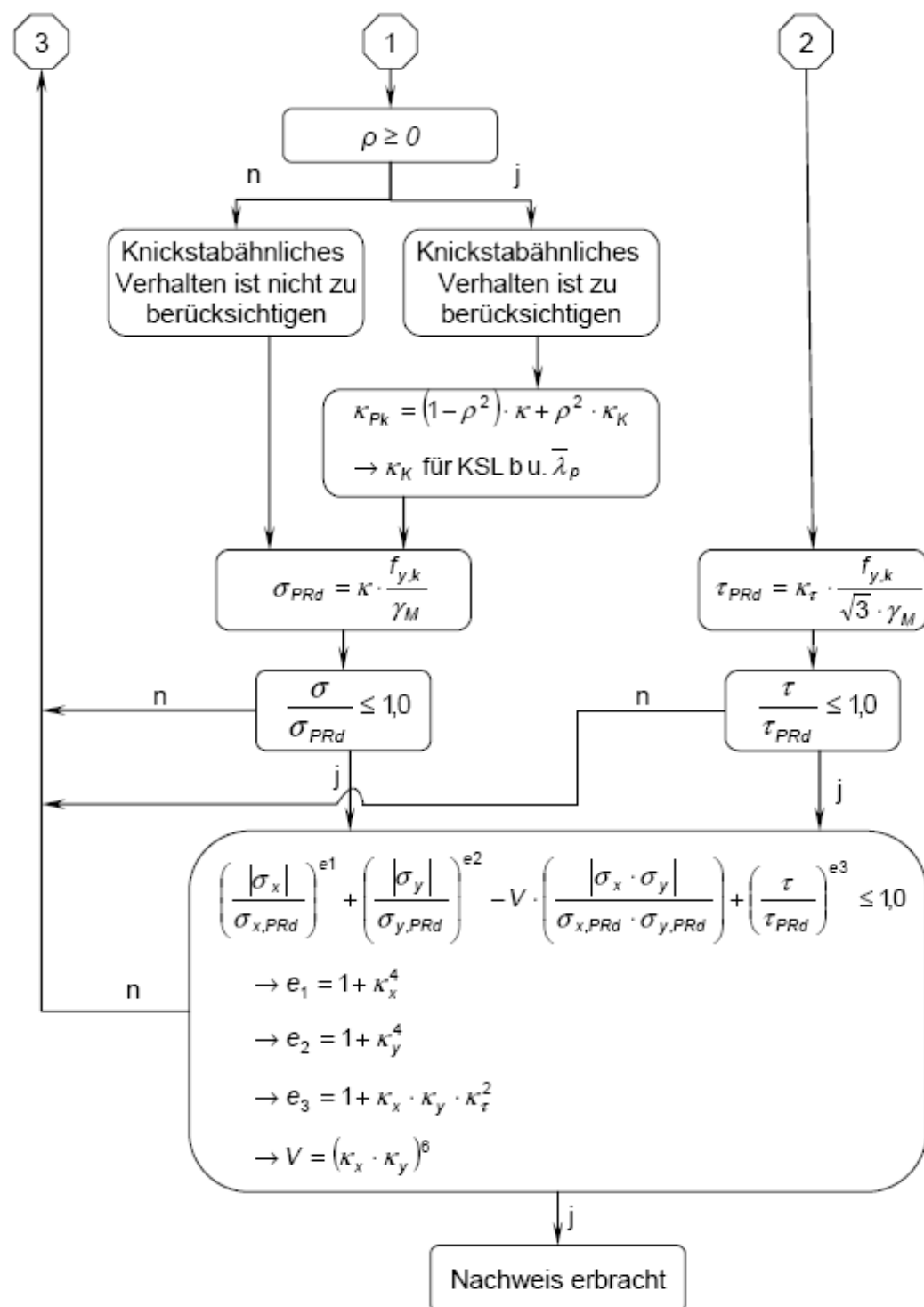


Abbildung 60: Struktogramm Beulsicherheitsnachweis

4. Grundlagen der Nachweisführung

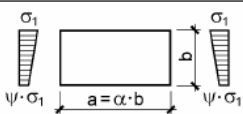
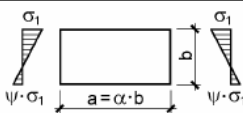
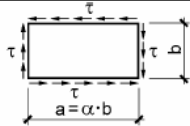
Beanspruchung		ideale Beulspannung	Gültigkeitsbereich	Beulwert
Geradlinig verteilte Druckspannungen $0 \leq \psi \leq 1$		$\sigma_{1,Pl} = k_{\sigma} \sigma_e$	$\alpha \geq 1$	$k_{\sigma} = 8,2 / (\psi + 1,05)$
Geradlinig verteilte Druck- und Zugspannungen $-1 \leq \psi < 0$		$\sigma_{1,Pl} = k_{\sigma} \sigma_e$	$\alpha \geq 1$	$k_{\sigma} = 7,81 - 6,29 \cdot \psi + 9,78 \cdot \psi^2$
Schubspannungen		$\tau_{Pl} = k_{\tau} \sigma_e$	$\alpha \geq 1$	$k_{\tau} = 5,34 + 4,00/\alpha^2$
$\sigma_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 = 18.980 \cdot \left(\frac{t}{b} \right)^2 \left[\frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \right]$				

Abbildung 61: Tabelle 1 für Beulsicherheitsnachweis

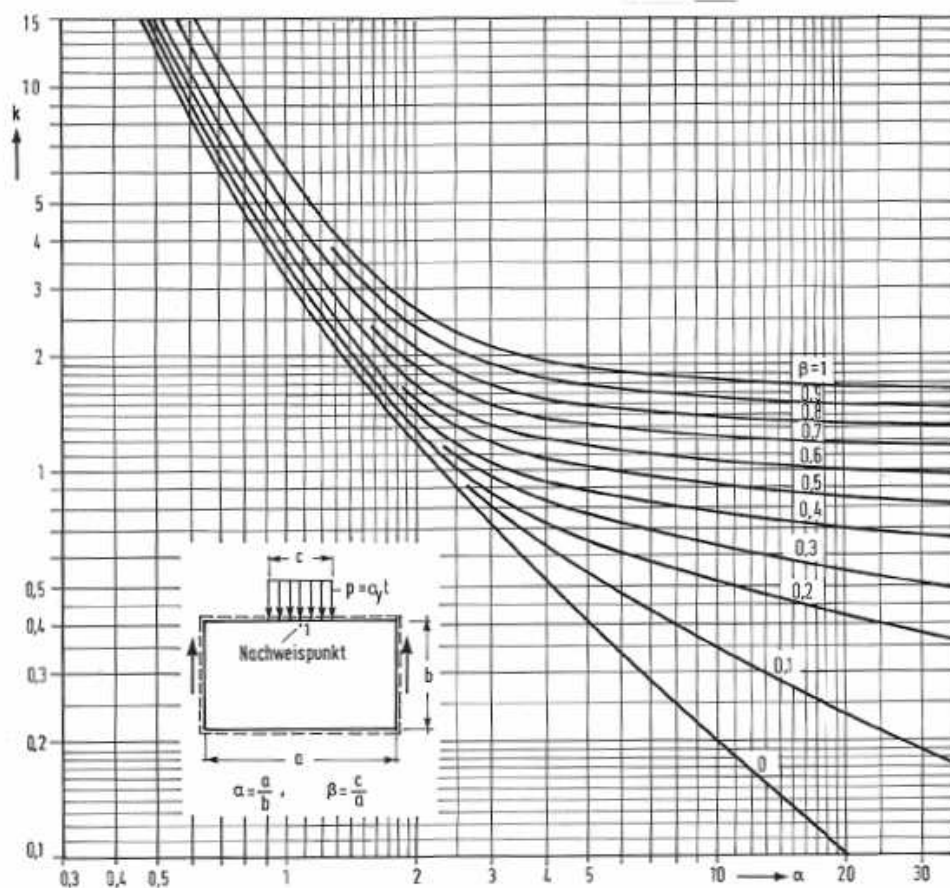
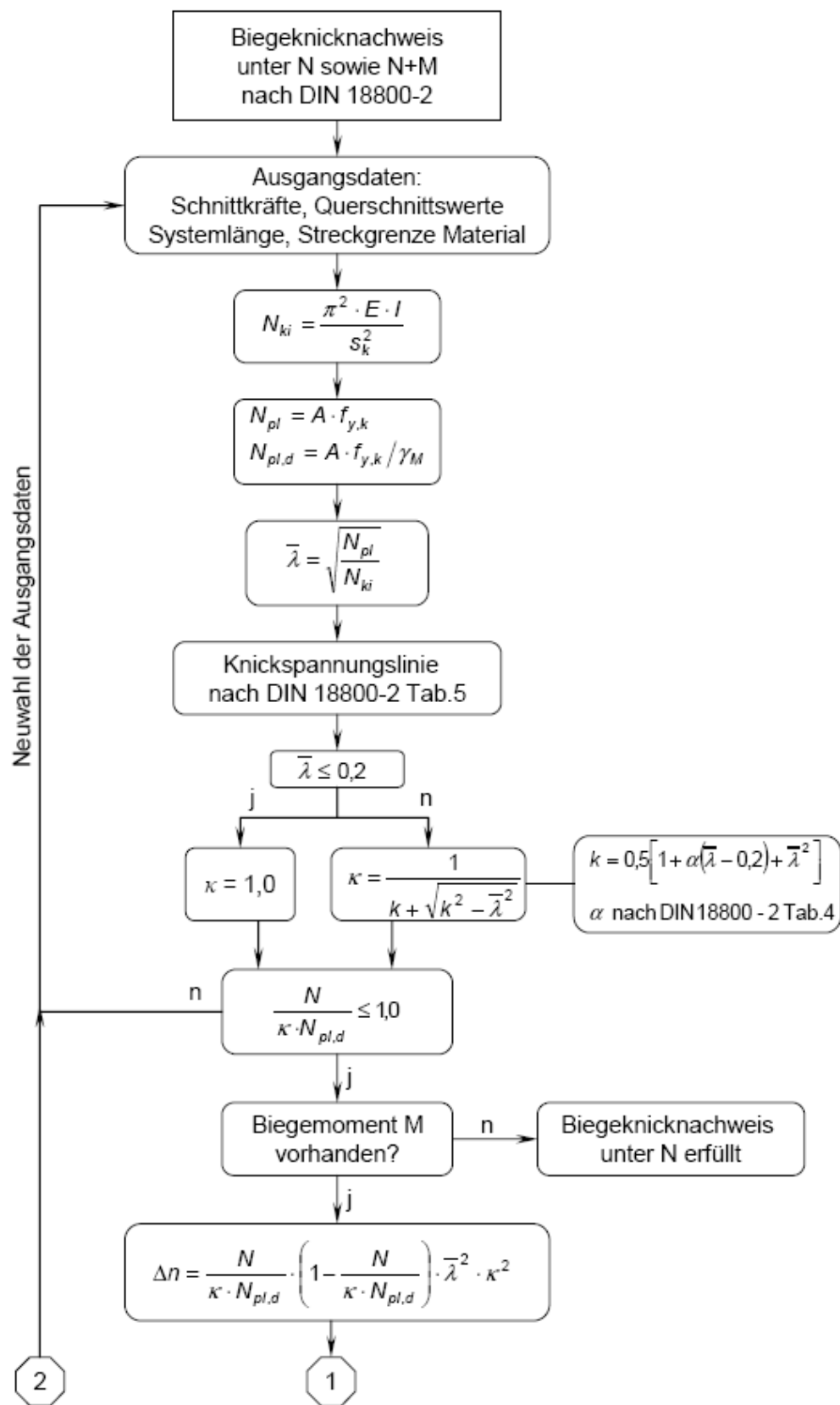


Abbildung 62: Diagramm für Beulsicherheitsnachweis nach [14]

4. Grundlagen der Nachweisführung

	1	2	3	4	5
	Beulfeld	Lagerung	Beanspruchung	Bezogener Schlankheitsgrad	Abminderungsfaktor
1	Einzel-feld	allseitig gelagert	Normalspannungen σ mit dem Randspannungs-verhältnis $\psi_T \leq 1$ ^a	$\bar{\lambda}_P = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{Pi}}}$	$\kappa = c \left(\frac{1}{\bar{\lambda}_P} - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_P^2} \right) \leq 1$ mit $c = 1,25 - 0,12 \psi_T \leq 1,25$
2		allseitig gelagert	Schubspannungen τ	$\bar{\lambda}_P = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\tau_{Pi} \cdot \sqrt{3}}}$	$\kappa_T = \frac{0,84}{\bar{\lambda}_P} \leq 1$
3	Teil- und Gesamt-feld	allseitig gelagert	Normalspannungen σ mit dem Randspannungs-verhältnis $\psi \leq 1$	$\bar{\lambda}_P = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{Pi}}}$	$\kappa = c \left(\frac{1}{\bar{\lambda}_P} - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_P^2} \right) \leq 1$ mit $c = 1,25 - 0,25 \psi \leq 1,25$
4		dreiseitig gelagert	Normalspannungen σ	$\bar{\lambda}_P = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{Pi}}}$ ^b	$\kappa = \frac{1}{\bar{\lambda}_P^2 + 0,51} \leq 1$
5		dreiseitig gelagert	konstante Rand-verschiebung u	$\bar{\lambda}_P = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{Pi}}}$ ^b	$\kappa = \frac{0,7}{\bar{\lambda}_P} \leq 1$
6		allseitig gelagert, ohne Längssteifen	Schubspannungen τ	$\bar{\lambda}_P = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\tau_{Pi} \cdot \sqrt{3}}}$	$\kappa_T = \frac{0,84}{\bar{\lambda}_P} \leq 1$
7		allseitig gelagert, mit Längssteifen	Schubspannungen τ	$\bar{\lambda}_P = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\tau_{Pi} \cdot \sqrt{3}}}$	$\kappa_T = \frac{0,84}{\bar{\lambda}_P} \leq 1$ für $\bar{\lambda}_P \leq 1,38$ $\kappa_T = \frac{1,16}{\bar{\lambda}_P^2} \leq 1$ für $\bar{\lambda}_P > 1,38$
^a Bei Einzelfeldern ist ψ_T das Randspannungsverhältnis des Teilfeldes, in dem das Einzelfeld liegt. ^b Zur Ermittlung von σ_{Pi} ist der Beulwert $\min k_\sigma(\alpha)$ für $\psi = 1$ einzusetzen.					

Abbildung 63: Tabelle 2 für Beulsicherheitsnachweis nach [3]



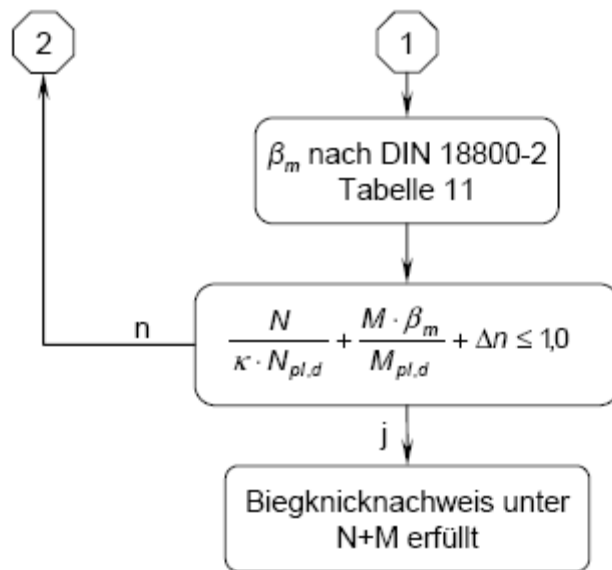


Abbildung 64: Struktogramm Biegeknicknachweis

4.5.2 Nachweisführung mittels Finite Elemente Methode

In diesem Kapitel werden die genauen Ein- und Ausgabeparameter vorgestellt und erläutert. Die Grundlagen der Modellierung ist dem Kapitel 4.4 zu entnehmen.

4.5.2.1 Eingabeparameter FEM

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln erwähnt, erfolgt die Eingabe der Hauptträgerstruktur als 2D-Flächenelemente und die Verbände als 1D-Stabelemente. Um den Schlupf in den Schraubverbindungen zu erfassen, werden die Verbandsstäbe mit einer Stabnichtlinearität vom Typ Schlupf versehen. Für die Größe u_x wird der Wert nach DIN 18800-1 Tabelle 6 mit 2mm für eine SLV Verbindung bis zur Größe M27 angesetzt. Für die Verbindung zwischen VBS und Brückenkonstruktion wird dieser Schlupf jedoch nicht berücksichtigt, da die geschraubten Laschenstöße als Passverbindung ausgeführt werden und somit ein Schlupf $\leq 0,3\text{mm}$ anzusetzen ist. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf das Ergebnis. Das nichtlineare Materialverhalten wird über das Zusatzmodul RF-MAT-NL [31] durch Wahl des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs berücksichtigt.

Zur Generierung der Struktur hinsichtlich der eingestellten Netzgröße wird zwischen Spannungs- und Stabilitätsuntersuchung differenziert. Zur Spannungsanalyse hat sich eine Netzgrößeneinstellung von 15cm als hinreichend genau erwiesen. Eine weitere Verfeinerung erhöht die Genauigkeit nur unbedeutend, jedoch steigt die Rechenzeit dadurch an. Als Netzform werden grundsätzlich quadratische Elemente gebildet. Bei einer Differenz größer 10% in den Diagonallängen der Elemente werden automatisch Dreieckselemente generiert. Um Spannungsspitzen im Bereich von Lasteinleitungsstellen beziehungsweise in einzelnen Knotenpunkten zu eliminieren, wird eine Netzvergrößerung auf 20cm an diesen Stellen vorgenommen. Zur Untersuchung der Stabilität hat sich eine Netzgröße von 8cm als genauer erwiesen. Weiterhin wird bei der Stabilität die entlastende Wirkung aus Zugkräften berücksichtigt sowie die Reduzierung der Steifigkeit durch den Teilsicherheitsfaktor γ_m aktiviert. Die Berechnung erfolgt nach der Unterraum-Iterationsmethode.

4.5.2.2 Ausgabeeigenschaften FEM

Für die Ausgabe und Auswertung der Ergebnisverläufe stehen zahlreiche Anzeigefunktionen zur Verfügung, die jedoch nicht alle relevant für die Untersuchung sind. Betrachtet werden nur die Spannungsanzeigen für σ_x , σ_y und σ_{xy} . Die Berechnungsgrundlagen sind dabei wie folgt definiert:

$$\sigma_x = \frac{n_x}{h} \pm \frac{6 \cdot m_x}{h^2} \quad \text{Spannung bezogen auf die lokale x-Achse der Fläche}$$

$$\sigma_y = \frac{n_y}{h} \pm \frac{6 \cdot m_y}{h^2} \quad \text{Spannung bezogen auf die lokale y-Achse der Fläche}$$

$$\sigma_{xy} = \frac{n_{xy}}{h} \pm \frac{6 \cdot m_{xy}}{h^2} \quad \text{Schubspannung}$$

h *Dicke der Fläche*

n_x, n_y *Normalkraft in Richtung der lokalen Achse [kN/m]*

m_x, m_y *Biegemoment, das Spannung in Richtung der lokalen Achse erzeugt [kNm/m]*

$n_{x,y}$ *Schubfluss [kN/m]*

$m_{x,y}$ *Drillmoment [kNm/m]*

Der Wert m ist nicht mit dem Biegemoment im eigentlichen Sinne zu verwechseln. Da es sich bei den Flächen um Schalenelemente handelt, werden die Biegemomente in Form von Normalkräften berücksichtigt. Die Werte n und m sind dabei jeweils auf die Breite der einzelnen Flächen bezogen und werden daher auch als Kleinbuchstaben dargestellt, um Verwechslungen mit den Schnittkräften N und M auszuschließen. Folgender Zusammenhang besteht zwischen dem FEM Nachweis und dem Nachweis nach DIN18800-1.

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} \quad \text{mit } W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad \text{und } A = b \cdot h \quad (\text{bezogen auf eine Rechteckfläche})$$

$$n = \frac{N}{b} \quad \text{und} \quad m = \frac{M}{b}$$

$$\sigma = \frac{\left(\frac{N}{b}\right)}{\frac{b \cdot h}{6}} \pm \frac{\frac{M}{b}}{\frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{n}{h} \pm \frac{6 \cdot m}{h^2}$$

Für die Anzeige der Vergleichsspannung stehen vier Möglichkeiten zur Verfügung. Jede dieser Möglichkeiten basiert auf unterschiedlichen Berechnungsansätzen. Diese sind in Tabelle 2 dargestellt.

Nachweismethode der Vergleichsspannung	Berechnungsgrundlagen nach [1] und [17]
FEM nach VON MISES	$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \sigma_{xy}^2}$
FEM nach TRESCA	$\sigma_v = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \cdot \sigma_{xy}^2}$
FEM nach RANKINE	$\sigma_v = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_x + \sigma_y) \pm \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \cdot \sigma_{xy}^2}$
FEM nach BACH	$\sigma_v = \frac{1-\mu}{2} (\sigma_x + \sigma_y) \pm \frac{1+\mu}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \cdot \sigma_{xy}^2}$
DIN 18800-1 (748)	$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau^2}$

Tabelle 2: Definition der Vergleichsspannung

Für den Nachweis der Vergleichsspannung am VBS wird der Nachweis nach VON MISES verwendet, da dieser dem in DIN 18800-1 (748) entspricht.

Die Ausgabe der Stabilitätsuntersuchung erfolgt grafisch in Abhängigkeit der Eigenform. Die Abbildung gibt dabei Auskunft über die Art des Versagens, dass heißt, es wird in der Ein- oder Ausgabe nicht zwischen Beulen, Knicken oder Biegedrillknicken unterschieden. Für die Betrachtung ist jedoch nur der Versagensfall mit der ersten Eigenform von Bedeutung, da sich dieses Versagen als erstes einstellt. Weiterhin wird zur jeweiligen Eigenform der dazugehörige Verzweigungslastfaktor η_{ki} angegeben.

Der Verzweigungslastfaktor ist definiert mit:

$$\eta_{ki} = \frac{N_{ki,d}}{N}$$

Dieser Wert multipliziert mit der Belastung ergibt die Grenzlaster, bei deren Überschreitung die angezeigte Stabilitätsfigur maßgebend wird. Im Konkreten bedeutet dies, dass der Wert η_{ki} kleiner 1,0 sein muss, damit Stabilität und damit die angezeigte Stabilitätsfigur maßgebend wird. Da der Verzweigungslastfaktor jedoch ebenfalls abhängig von den Modellierungsparametern ist, wird die Grenze für η_{ki} auf der sicheren Seite liegend mit 1,05 definiert, bei dessen Unterschreitung Stabilitätsversagen als maßgebend betrachtet wird.

Als Alternative besteht auch die Möglichkeit, statt der tatsächlichen Belastung die Last 1,0 auf das System aufzubringen. Als Verzweigungslastfaktor erhält man dadurch einen sehr großen Wert. Dieser multipliziert mit der Last 1,0 ergibt die maximale Einwirkung, welche vom System aufgenommen werden kann, bevor Stabilitätsversagen maßgebend wird.

5 Lastfallbildung und Schnittkraftermittlung

5.1 Lastfallbildung

Die Lastfälle werden entsprechend den im Kapitel 4 beschriebenen Voraussetzungen ermittelt. Die Eingabewerte ins Stabwerksprogramm können im Einzelnen dem Anhang A 1.1 entnommen werden.

• Lastfall 1: Eigengewicht Brückenkonstruktion

Das Eigengewicht der Brückenkonstruktion beläuft sich auf 270t. Zur Berücksichtigung von Aussteifungen sowie Kleinteilen wird dieses Gewicht mit dem Faktor 1,035 multipliziert. Die sich daraus ergebenden anzusetzenden Flächenlasten der einzelnen Baugruppen können der Tabelle 3 entnommen werden.

Baugruppe	Wert	Einheit
Versteifungsträger	7,36	kN/m
Querträger inkl. Fahrbahnblech	2,14	kN/m
Endquerträger	11,53	kN/m
Bogen	3,31	kN/m
Riegel	2,83	kN/m
Hänger	0,52	kN/m

Tabelle 3: Eigengewicht für die Baugruppen der Brücke

• Lastfall 2: Eigengewicht Vorbauschnabel

Das Eigengewicht des Vorbauschnabels ist abhängig von der jeweiligen Variante. Die Größe der Einwirkung stammt aus einer Abschätzung anhand einer ersten Vorbemessung. Wie in Kapitel 4 erläutert, werden die Varianten gruppenweise zusammengefasst, sodass die Anzahl der Lastfälle übersichtlich bleibt. Das angegebene Eigengewicht ist bezogen auf je einen Hauptträger und beinhaltet sowohl dessen Gewicht selbst, als auch anteilig das der Verbände. Als Einwirkungsgröße des Eigengewichtes ergeben sich somit 4,0 kN/m; 4,5 kN/m; 5,0kN/m und 5,5 kN/m.

• Lastfall 3: Hängeraussteifung

Da die Hängeraussteifung zum Zeitpunkt der Lastermittlung noch nicht endgültig definiert wurde, wird pauschal je Hänger eine Last von 2,5 kN/m zugrunde gelegt. Dies liegt auf der sicheren Seite, beeinflusst das Ergebnis jedoch nicht negativ, da die Wirkung im Gegensatz zu den restlichen Lasten sehr gering ausfällt und dies somit als hinreichend genau betrachtet werden kann.

• Lastfall 4: Windeinwirkung auf die Brückenkonstruktion

Wind auf Versteifungsträger der Fahrbahn

nach DIN FB 101, Anh. N, Tab. N2, WZ 3 – Binnenland, $z_e < 20\text{m}$

$$\frac{b}{d} = \frac{7}{1,65} = 4,25$$

$$W = 1,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$q_{\text{Wind}} = W \cdot d = 1,4 \cdot 1,65 \cdot 0,4 = 0,924 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Die Windlast ist dabei je Versteifungsträger anzusetzen.

Wind auf Bogen

nach DIN 1055-4, 12.4 – Kraftbeiwerte für Bauteile mit rechteckigem Querschnitt

$$c_f = c_{f0} \cdot \psi_r \cdot \psi_A$$

$$\frac{d}{b} = \frac{500}{600} = 0,833$$

$$c_{f0} \rightarrow \text{Bereich B}$$

$$c_{f0} = 0,7121 \cdot \ln\left(\frac{d}{b}\right) + 2,146 = 0,7121 \cdot \ln(0,833) + 2,146 = 2,27$$

$$\psi_r = 1,0 \quad \text{da } r = 0$$

Schlankheit λ nach Tab.16, Zeile 5, für $l \geq 50\text{m}$

$$\lambda = \frac{54}{0,6} = 90 > 70$$

$$\varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{47,2}{54 \cdot 10,78} = 0,08$$

$$\psi_A \text{ nach Bild 26 : } \psi_A = 1,0$$

$$c_f = 2,27 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 2,27$$

$$F_W = c_f \cdot q_{(ze)} \cdot A_{ref}$$

$$q = 0,95 \frac{kN}{m^2} \text{ für WZ 3, Binnenland}$$

Um die Last als Linienlast im Stabwerksprogramm einzugeben, wird anstelle A_{ref} nur die Bogenhöhe h eingesetzt.

$$q_{Wind, Bogen} = c_f \cdot q_{(ze)} \cdot h_{Bogen}$$

Da die Bogenhöhe zwischen Rand mit 1050mm und Mitte mit 600mm variiert, ergibt sich somit.

$$q_{Wind, Bogen, h=600} = 2,27 \cdot 0,95 \cdot 0,6 \cdot 0,4 = 0,52 \frac{kN}{m}$$

$$q_{Wind, Bogen, h=1050} = 2,27 \cdot 0,95 \cdot 1,05 \cdot 0,4 = 0,91 \frac{kN}{m}$$

Die Windlast $q_{Wind, Bogen}$ bezieht sich auf einen Bogen. Eine weitere Abminderung nach Punkt 12.10 [4] für hintereinander liegende Flächen, kann nicht in Betracht gezogen werden, da der Völligkeitsgrad zu gering und der Abstand der Bögen zu groß ist.

Wind auf Hänger inkl. Montagehilfsstützen

nach DIN 1055-4, 12.4 – Kraftbeiwerte für Bauteile mit rechteckigem Querschnitt. Dabei ist die Fläche des Aussteifungsprofils maßgebend. Da diese jedoch noch nicht festgelegt ist, wird von einer Fläche mit 300mmx300mm ausgegangen, dies entspricht dem Aussteifungsprofil HEB300. Die Ermittlung der Windlast erfolgt anhand des längsten Hängers.

$$c_f = c_{fo} \cdot \psi_r \cdot \psi_A$$

$$\frac{d}{b} = \frac{0,3}{10} = 0,03$$

$$c_{fo} = 2,0$$

$$\psi_r = 1,0 \text{ (keine Abrundung)}$$

$$\lambda = \frac{l}{b} = \frac{10}{0,3} = 33,3 < 70$$

$$\lambda = 70$$

$$\varphi = 1,0 \text{ (keine Ausschnitte/Aussparungen)}$$

$$\psi_A = 0,92$$

$$c_f = 2,0 \cdot 1,0 \cdot 0,92 = 1,84$$

$$q = 0,95 \frac{kN}{m^2} \text{ für WZ 3, Binnenland}$$

Um die Last als Linienlast im Stabwerksprogramm einzugeben, wird anstelle A_{ref} nur die Bogenhöhe h eingesetzt.

$$q_{Wind,H\ddot{a}nger} = c_f \cdot q \cdot b_{H\ddot{a}nger} = 1,84 \cdot 0,95 \cdot 0,16 \cdot 0,4 = 0,11 \frac{kN}{m}$$

Die Windlast gilt je Hänger.

Zusammenfassung

Baugruppe	Wert	Einheit
Versteifungsträger	0,924	kN/m
Bogen	0,52	kN/m
Bogen im Randbereich	0,91	kN/m
Hänger	0,11	kN/m

Tabelle 4: Windlasten für die Baugruppen der Brücke

• Lastfall 5: Wind auf Vorbauschnabel

Die Windbelastung am Vorbauschnabel wird analog zum Versteifungsträger der Brücke mit dem Wert 0,924 kN/m angesetzt.

• Lastfall 6: Baustellenverkehr

Der Baustellenverkehr von 1kN/m² für Personal mit geringer Ausrüstung nach DIN 1055-8 wird entlang der Versteifungsträger mit einer Lasteinzugsflche von 1,5m angesetzt. Somit ergibt sich eine Linienlast von 1,5 kN/m.

• Lastfall 7: Ballastiergewicht

Das Gewicht von 50t am Brückenende wird als Flächenlast auf die letzten fünf Querträger mit einer Einwirkungsgröße von 15,38 kN/m angesetzt.

• Lastkombinationen

Bei den Lastkombinationen wird zwischen Tragsicherheitsnachweis und Gebrauchstauglichkeitsnachweis unterschieden.

Nachweis der Tragsicherheit:

$$LK1 = 1,35 \cdot (LF1 + LF2 + LF3 + LF7) + 1,50 \cdot (LF4 + LF5 + LF6)$$

Nachweis der Gebrauchstauglichkeit:

$$LK1 = 1,0 \cdot (LF1 + LF2 + LF3 + LF4 + LF5 + LF6 + LF7)$$

5.2 Ermittlung der Auflagerreaktionen

Die Auflagerreaktionen werden für die Laststellung $x=0\text{m}$ (Schnabelspitze) und $x=10\text{m}$ (Übergang VBS - Brückenfußpunkt) ermittelt. Zwischenwerte können linear interpoliert werden. Im Einzelnen können die Ausgabewerte dem Anhang A 2.1 nachvollzogen werden. In der nachfolgenden Tabelle 5 bis Tabelle 8 sind alle Lagerreaktionen in Abhängigkeit des Vorbauschnabeleigengewichtes übersichtlich zusammengestellt. Beachtet werden muss, dass die in der Tabelle aufgelisteten Lagerreaktionen als Bemessungslasten für die Nachweisführung des Hauptträgers betrachtet werden müssen.

EG VBS [kN/m]	$F_{x1,d,x=0}$ [kN]	$F_{x1,d,x=10}$ [kN]	$F_{y1,d,x=0}$ [kN]	$F_{y1,d,x=10}$ [kN]	$F_{z1,d,x=0}$ [kN]	$F_{z1,d,x=10}$ [kN]
4,0	22	31	90	115	432	606
4,5	22	31	90	115	439	615
5,0	22	31	90	115	446	623
5,5	23	32	90	115	452	632

Tabelle 5: Schnittkräfte Hauptträger 1 für Tragsicherheitsnachweis

EG VBS [kN/m]	$F_{x2,d,x=0}$ [kN]	$F_{x2,d,x=10}$ [kN]	$F_{z2,d,x=0}$ [kN]	$F_{z2,d,x=10}$ [kN]
4,0	22	26	432	505
4,5	22	26	438	513
5,0	22	26	445	522
5,5	23	27	451	530

Tabelle 6: Schnittkräfte Hauptträger 2 für Tragsicherheitsnachweis

EG VBS [kN/m]	$F_{x1,d,x=0}$ [kN]	$F_{x1,d,x=10}$ [kN]	$F_{y1,d,x=0}$ [kN]	$F_{y1,d,x=10}$ [kN]	$F_{z1,d,x=0}$ [kN]	$F_{z1,d,x=10}$ [kN]
4,0	20	22	60	77	318	443
4,5	20	23	60	77	323	449
5,0	20	23	60	77	327	455
5,5	20	23	60	77	333	462

Tabelle 7: Schnittkräfte Hauptträger 1 für Gebrauchstauglichkeitsnachweis

EG VBS [kN/m]	$F_{x2,d,x=0}$ [kN]	$F_{x2,d,x=10}$ [kN]	$F_{z2,d,x=0}$ [kN]	$F_{z2,d,x=10}$ [kN]
4,0	16	20	318	376
4,5	16	20	323	382
5,0	16	20	327	388
5,5	16	20	333	394

Tabelle 8: Schnittkräfte Hauptträger 2 für Gebrauchstauglichkeitsnachweis

5.3 Ermittlung der Schnittkräfte zur analytische Berechnung

Um die Schnittkräfte in Abhängigkeit der Laststellung zu berücksichtigen, ist die Darstellung als Hüllfunktion sinnvoll. Dazu werden die Laststellungen bei $x=0\text{m}$, $x=2,5\text{m}$, $x=5\text{m}$ und $x=7,5\text{m}$ herangezogen. Somit ergeben sich vier Einflusslinien, die zu einer Hüllfunktion zusammengefasst werden können. Das Eigengewicht des Vorbauschabels wird mit $4,5\text{kN/m}$ zu Grunde gelegt.

Biegemomentenverlauf in Abhängigkeit der Laststellung

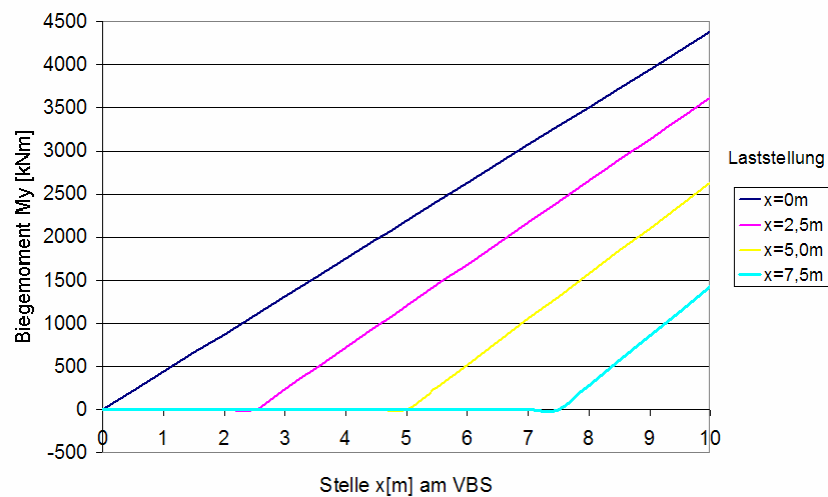


Diagramm 1: Biegemomentenverlauf M_y in Abhängigkeit der Laststellung

Querkraftverlauf in Abhängigkeit der Laststellung

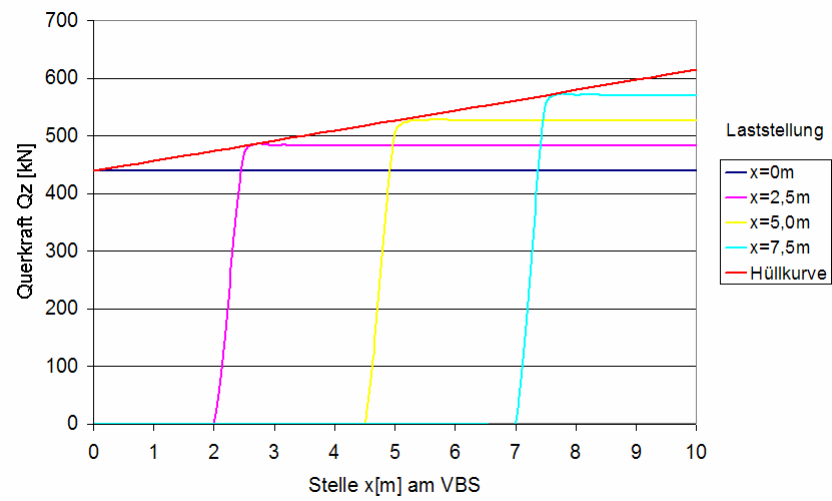


Diagramm 2: Querkraftverlauf Q_z in Abhängigkeit der Laststellung

Normalkraftverlauf in Abhängigkeit der Laststellung

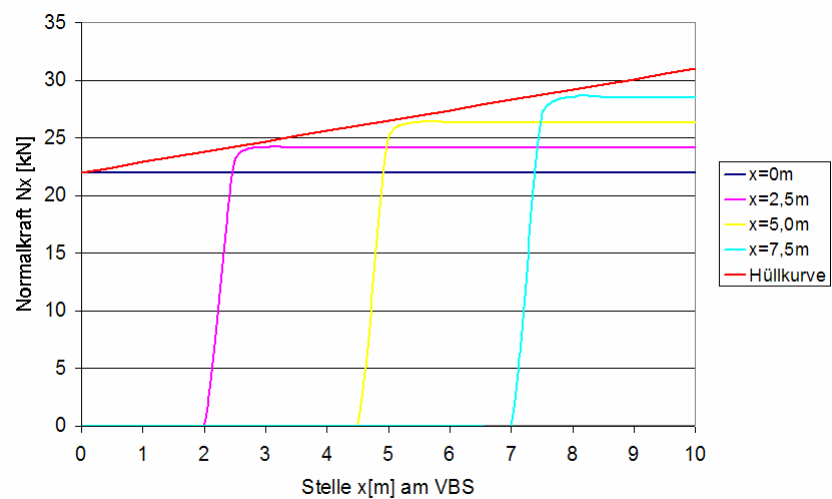


Diagramm 3: Normalkraftverlauf N_x in Abhängigkeit der Laststellung

6 Variantenuntersuchung Vorbauschnabel

6.1 Allgemeines

Das Ziel dieser Variantenuntersuchung ist es, eine hinsichtlich wirtschaftlicher Aspekte günstig dimensionierte Vorbauschnabelkonstruktion für das vorliegende Projekt zu erarbeiten. Dazu ist es notwendig, die statischen Aspekte zu klären und die Abhängigkeiten jedes einzelnen Parameters auf das System darzustellen. Dies soll den inhaltlichen Schwerpunkt in diesem Kapitel darstellen.

Die Reihenfolge der in den folgenden Kapiteln dargelegten Nachweisführungen ist so gewählt, dass die Untersuchungen aufeinander aufbauen und bestimmte Varianten aufgrund statischer oder konstruktiver Aspekte ausgeschlossen werden. Diese Varianten tauchen dann in den nachfolgend geführten Berechnungen und Betrachtungen nicht mehr auf.

Zu beachten ist, dass alle Tabellen und Abbildungen jeweils repräsentativ für eine bestimmte Abmessungs- und Lastkonstellation stehen.

Um die Abbildungen der FE-Berechnung hinsichtlich der Spannungsverläufe richtig zu interpretieren, ist es notwendig, die lokalen Achsensysteme der Einzelflächen zu kennen, da sich die Spannungen jeweils auf dieses lokale Achsensystem der Einzelflächen beziehen. In Abbildung 65 sind die lokalen Achsensysteme dargestellt. Die rot dargestellten Pfeile beziehen sich auf die x-Achse, grün auf die y-Achse und blau auf die z-Achse.

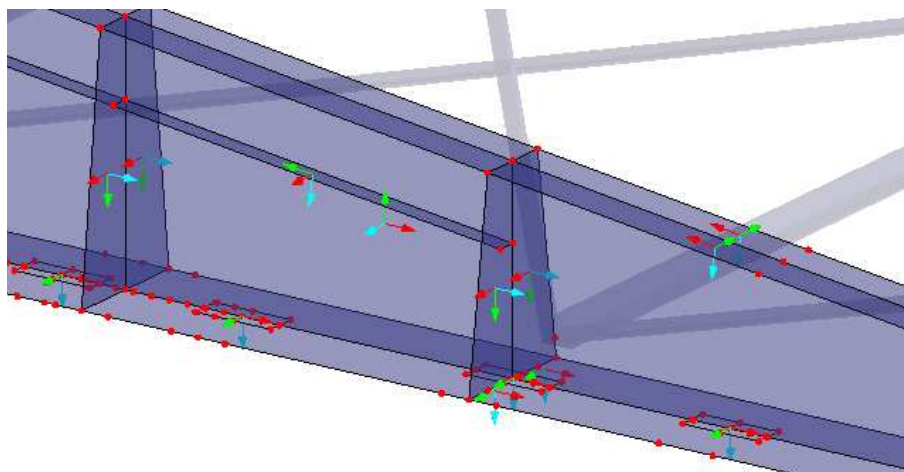


Abbildung 65: Definition der lokalen Achsensysteme der Einzelflächen

Weiterhin wird zur Beschreibung einer bestimmten Querschnitts- oder Einwirkungsstelle die Formulierung „an der Stelle x [m]“ verwendet. Dabei ist $x=0\text{m}$ auf die Schnabelspitze und $x=10\text{m}$ auf den Übergang VBS-Brückenfußpunkt bezogen. Die Definition der einzelnen Bauteile und Baugruppen ist der nachfolgenden Abbildung 66 zu entnehmen.

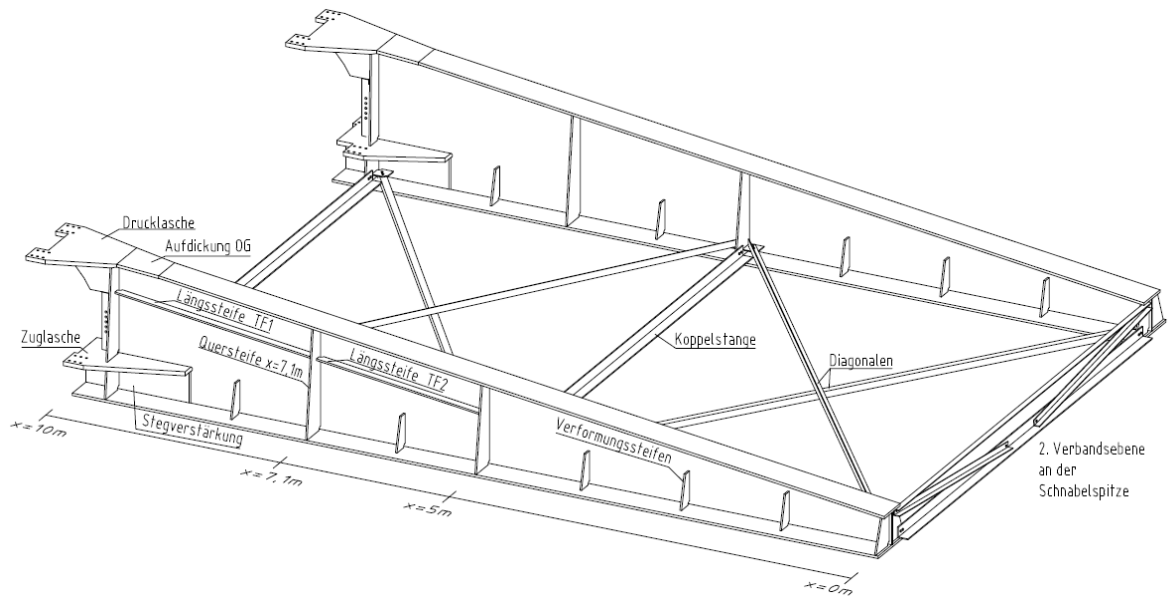


Abbildung 66: Bezeichnung der VBS - Bauteile

6.2 Verbandsfelder und Verbandsebenen

6.2.1 Allgemeines

Das Kapitel Verbandsfelder und Verbandsebenen soll als erster Punkt untersucht werden, da die Festlegungen über dessen Ausbildung als Basis für die Untersuchungen der Hauptträgerstruktur gelten.

Der Anordnung und Ausbildung der Verbände gilt ein besonderer Augenmerk, da diese zur Aufnahme der Seitenführungskraft herangezogen werden. Die Last wird dabei über den Untergurt des Hauptträgers an die Verbände weitergeleitet, insofern die Verbandsebene im Untergurt liegt. Somit kann eine ungünstig gewählte Verbandsausbildung negativen Einfluss auf die Verformung und die Größe der Spannungen auf den Hauptträger ausüben. Um dies zu vermeiden und gleichzeitig die Verbände selbst sinnvoll zu dimensionieren, werden in den beiden folgenden Kapiteln Einflüsse und Auswirkungen vorgestellt. Ziel ist dabei die Festlegung der Anzahl an Feldern und Ebenen als Basis für alle weiterführenden Untersuchungen.

6.2.2 Auswirkungen der Verbandfelderanzahl

Zunächst soll gegenübergestellt werden, wie sich die Schnittkräfte in den Verbandsfeldern bei unterschiedlicher Anzahl an Verbandsfeldern ändern und welche Profilgrößen daraus resultieren. Die maßgebenden Schnittkräfte können dem Anhang A 2.3, die Bemessung der Profile dem Anhang B 2 entnommen werden. Da der Einfluss der nach Theorie II.Ordnung berechneten Schnittkräfte kleiner als 10% ist, wird der Biegeknicknachweis für Stabilitätsgefährdete Stäbe geführt.

Im Konkreten werden eins, zwei und drei Verbandsfelder, die jeweils als K-Verband sowie Kreuzverband ausgeführt werden, gegenübergestellt. Vorteil bei der Konstruktion als Kreuzverband ist, dass die Koppelstangen als Fachwerkstäbe und die Diagonalen als Zugstange definiert werden können. Demzufolge müssen die Koppelstangen im Gegensatz zum K-Fachwerk auch keine Biegemomente und die Diagonalen keinen Druckkräfte aufnehmen. Dadurch werden insbesondere bei den Diagonalen kleinere Profilgrößen verwendet, da keine Stabilitätsgefährdung vorliegt. In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Profilbemessung für das Material in S235 aufgelistet.

	1 Verbandsfeld	2 Verbandsfelder	3 Verbandsfelder
Diagonale K – Verband	L 200x20	L 150x10	L 100x12
Diagonale Kreuzverband	L 100x10	L 80x8	L 70x7
Koppelstange K – Verband	L 200x18	L 130x12	L 130x12
Koppelstange Kreuzverband	L 200x16	L 130x12	L 130x12

Tabelle 9: Ergebnis der Profilbemessung bei einer Verbandsebene

Zu beachten ist, dass die Wahl des Koppelstangenprofils an der Schnabelspitze großen Einfluss auf die Verformung des Hauptträgers nimmt, was wiederum die Berechnung nach Theorie II.Ordnung beeinflusst. Im Kapitel 6.2.3 wird darauf genauer eingegangen.

In Tabelle 10 und Tabelle 11 wird die Gewichtsermittlung für die Verbandsfelder durchgeführt. Daran lässt sich ableiten, welche Ausführung hinsichtlich des Materialverbrauchs am günstigsten ausfällt. Der Fertigungsaufwand für Zuschnitt und Bohren wird nicht betrachtet, da dieser aufgrund der geringen Anzahl an Stäben vernachlässigt werden kann.

	1 Verbandsfeld	2 Verbandsfelder	3 Verbandsfelder
Profil Diagonalen	L 200x20	L 150x10	L 100x12
Σ Länge d. Diagonalen	20,2 m	23 m	25,8
Σ Gewicht d. Diag.	1210 kg	529 kg	469 kg
Profil Koppelstange	L 200x16	L 130x12	L 130x12
Σ Länge d. Koppelst.	6,5 m	13,0 m	19,5 m
Σ Gewicht d. Koppelst.	315 kg	307 kg	460 kg
Gesamtgewicht	1525 kg	838 kg	929 kg
Gewichtserhöhung ¹⁾ um	45,1 %	-	10,0 %
¹⁾ Im Bezug auf 2 Verbandsfelder			

Tabelle 10: Gewichtsermittlung für K-Verband

	1 Verbandsfeld	2 Verbandsfelder	3 Verbandsfelder
Profil Diagonalen	L 100x10	L 80x8	L 70x7
Σ Länge d. Diagonalen	23,86 m	32,8 m	43,05 m
Σ Gewicht d. Diag.	358 kg	316 kg	318 kg
Profil Koppelstange	L 200x16	L 130x12	L 130x12
Σ Länge d. Koppelst.	6,5 m	13,0 m	19,5 m
Σ Gewicht d. Koppelst.	315,5 kg	307 kg	460 kg
Gesamtgewicht	673,5 kg	623 kg	778 kg
Gewichtserhöhung ²⁾ um	8,1 %	-	24,8 %
²⁾ Im Bezug auf 2 Verbandsfelder			

Tabelle 11: Gewichtsermittlung für Kreuzverband

Es zeigt sich, dass für den vorliegenden Fall bei zwei Feldern in der Ausführung als Kreuzverband die geringsten Materialkosten entstehen. Als Orientierung über die Felderanzahl bei anderen Abmessungsverhältnissen der Achsmaße des Hauptträgers, kann die lichte Breite zwischen den Hauptträgern als Maß für die Feldlänge herangezogen werden.

Die Anzahl und Ausführung der Verbandfelder hat jedoch nicht nur Einfluss auf die Dimensionierung der Profile, sondern maßgeblich auf die am Hauptträger entstehenden Spannungen und Verformungen. Beachtet werden muss, dass die Last aus seitlicher Führung keine globale Wirkung auf den Vorbauschnabelhauptträger ausübt, sondern nur lokal am Untergurt wirkt. Dies kann anhand der in der Abbildung 67 dargestellten Vergleichsspannung entnommen werden. Darin ist ersichtlich, dass die Spannung bei alleiniger Wirkung der Seitenführungskraft nur lokal auf den Untergurt begrenzt ist und der Steg sowie andere Querschnittsteile nahezu spannungsfrei bleibt.

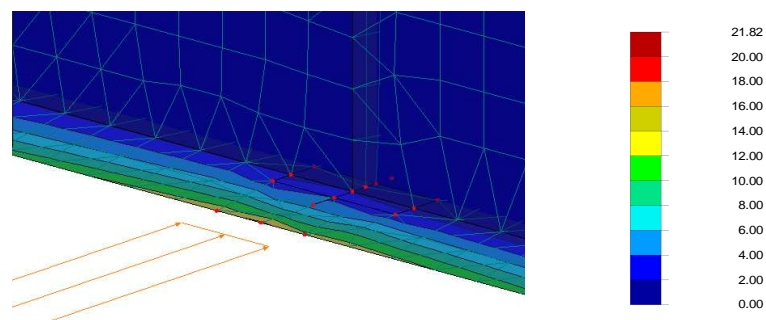


Abbildung 67: Lokale Spannung im Untergurt infolge Seitenführungskraft

In Tabelle 12 ist aufgezeigt, wie sich die lokalen Spannungen im Untergurt für $t_{UG}=20\text{mm}$ in Abhängigkeit der Laststellung und der Verbandfelderanzahl verhält. Daran ist ersichtlich, dass aufgrund der fehlenden seitlichen Halterung, bei nur einem Verbandsfeld, die Spannungen zur Mitte hin stark ansteigen. Die Ermittlung der Spannungen erfolgt zum einem mittels FEM, zum anderen mittels analytischer Berechnung. Die maßgebenden Schnittkräfte können dem Anhang A 2.3, die analytische Berechnung dem Anhang B 2 entnommen werden.

	LS x=0m	LS x=1,66m	LS x=2,5m	LS x=5,0m	LS x=7,5m	LS x=8,33m	Einheit
max σ_v - FEM 1 Verbandsfeld	2,60	-	10,36	13,63	9,65	-	kN/cm ²
max $\sigma_v / \sigma_{R,d}$	0,12	-	0,47	0,63	0,44	-	-
max σ_v - FEM 2 Verbandsfeld	3,30	-	7,44	2,63	8,10	-	kN/cm ²
max $\sigma_v / \sigma_{R,d}$	0,15	-	0,34	0,12	0,37	-	-
max σ_v - FEM 3 Verbandsfeld	3,80	3,46	-	4,29	-	3,28	kN/cm ²
max $\sigma_v / \sigma_{R,d}$	0,17	0,16	-	0,20	-	0,15	-
max σ_v - Hand 1 Verbandsfeld	1,43	-	10,52	15,08	11,89	-	kN/cm ²
max $\sigma_v / \sigma_{R,d}$	0,07	-	0,48	0,69	0,55	-	-
max σ_v - Hand 2 Verbandsfeld	1,43	-	5,50	2,18	5,95	-	kN/cm ²
max $\sigma_v / \sigma_{R,d}$	0,07	-	0,25	0,10	0,27	-	-
max σ_v - Hand 3 Verbandsfeld	1,43	4,49	-	4,04	-	5,42	kN/cm ²
max $\sigma_v / \sigma_{R,d}$	0,07	0,21	-	0,19	-	0,25	-

Tabelle 12: Auswirkung der Verbandsfelderzahl auf die Spannungen im Untergurt

Es ist erkennbar, dass bei einem Verbandsfeld die maximale Auslastung nach der FE-Methode mit 63% um 26% höher liegt, im Gegensatz zur maximalen Auslastung bei zwei Verbandsfeldern mit 37%. Die Differenz in der Auslastung zwischen zwei und drei Verbandsfeldern beläuft sich auf maximal 17%. Somit scheint auch aus Sicht der Spannungen ein Verbandsfeld als ungünstig.

Zuletzt soll noch die Verformung betrachtet werden. Dabei wird nur die Stelle aufgezeigt, an der die Verformung unter den gegebenen Randbedingungen ihren maximalen Wert erreicht. Als Einwirkung wirkt nur die horizontale Seitenführungskraft.

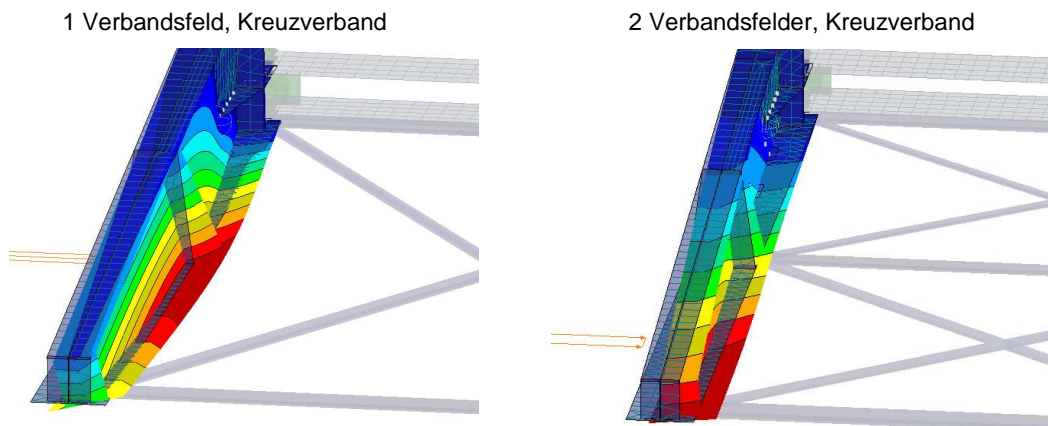


Abbildung 68: Verformung Untergurt infolge Seitenführungskraft

Zu erkennen ist die Verformungsfigur bei einem sowie bei zwei Verbandsfeldern. Bei einem Verbandsfeld entstehen dabei große Verformungen bei gleichzeitiger Verdrehung, da der Untergurt ungenügend seitlich gehalten wird. Dies ist bei mehreren Feldern aufgrund der zusätzlichen Kopplung ausgeschlossen und die maximalen Verformungen treten an der Schnabelspitze auf, zudem werden die Verdrehungen des Untergurts minimiert.

6.2.3 Auswirkungen der Verbandsebenen

Neben der Wahl der Verbandsfelderzahl steht auch die Frage einer zweiten Verbandsebene am Obergurt im Raum. Die Anordnung einer zweiten Verbandsebene sorgt insbesondere dafür, dass die Gesamtsteifigkeit des Systems zunimmt. Dabei ist es jedoch nicht erforderlich, die Felderanzahl der zweiten Ebene am Obergurt in gleicher Weise zur ersten Ebene am Untergurt auszubilden. Da am vorliegenden Beispiel des Vorbauschnabels, welcher als Kragträger angesehen werden kann, die Verformungen und Verdrehungen an der Schnabelspitze ihren maximalen Wert erreichen, sorgt die Anordnung einer weiteren Ebene an der Schnabelspitze für eine Reduzierung der Verformungen. Eine zweite Ebene in der Mitte ist nur erforderlich, wenn der Stabilitätsfall Biegedrillknicken maßgebend wird, da somit die Knicklänge halbiert wird.

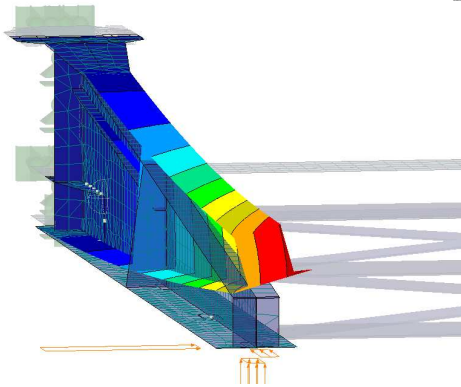
Das Ergebnis der Profilbemessung der zweiten Ebene an der Schnabelspitze ist in der nachfolgenden Tabelle 13 aufgezeigt. Die Berechnung dafür kann dem Anhang B 2 entnommen werden.

Bezeichnung	Profil
Koppelstange UG	L 130x12
Koppelstange OG	L 70x7
Diagonalstäbe	L 70x7

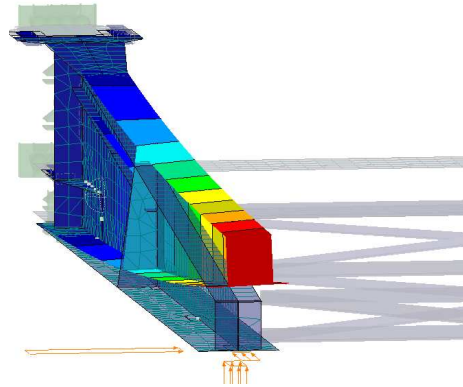
Tabelle 13: Profilwahl der zweiten Verbandsebene

In der Abbildung 69 werden eine und zwei Verbandsebenen hinsichtlich Verdrehung und Verformung der Hauptträgerstruktur gegenübergestellt.

eine Verbandsebene am Untergurt



Verbandsebenen am Unter- und Obergurt


Abbildung 69: Vergleich der Verformungen bei einer und zwei Verbandsebenen

Aus der Abbildung ist zuerkennen, dass eine zweite Ebene der Verdrehung der Schnabelspitze wirkungsvoll entgegenwirkt. Dies verdeutlichen die in der nachfolgenden Tabelle 14 aufgelisteten Werte, welche nach Theorie II.Ordnung ermittelt wurden.

		Profil Koppelstange an Schnabelspitze bei einer Verbandsebene				zwei Verbands- ebenen
Beschreibung	Abk.	L200x16	L180x16	L150x15	L130x12	
Gesamtverformung (Maximalwert)	u_{\max} [mm]	75,5	76,4	79,0	85,5	76,4
Verformung in Richt. der global x-Achse	u_x [mm]	7,6	7,6	7,6	7,8	7,6
Verformung in Richt. der global y-Achse	u_y [mm]	12,8	13,1	14,0	16,2	13,1
Verformung in Richt. der global z-Achse	u_z [mm]	74,1	75,0	77,5	83,7	74,8
Verdrehung um die globale x-Achse	φ_x [mrad]	7,2	9,5	16,8	34,4	9,1
Verdrehung um die globale y-Achse	φ_y [mrad]	12,2	12,1	12,1	14,3	12,1
Verdrehung um die globale z-Achse	φ_z [mrad]	1,6	1,7	1,7	2,1	1,7

Tabelle 14: Gegenüberstellung der Verformung für eine und zwei Verbandsebenen

Der Vergleich zeigt, dass bei nur einer Ebene die Wahl des Koppelstangenprofils großen Einfluss auf die Verformungen sowie Verdrehungen ausübt. Ein zu weiches Profil ist zwar hinsichtlich der Tragfähigkeit denkbar, jedoch beeinflusst es die Gebrauchstauglichkeit negativ. Dabei zeigen sich bei einer Ebene für das Profil L180x16, annähernd gleiche Verformungswerte im Vergleich zur zweiten Ebene. Daher wird auch der nachfolgende Ver-

gleich zwischen einer und zwei Verbandsebenen in Tabelle 15 anhand der genannten Profilgröße durchgeführt.

	1 Verbandsebene	2 Verbandsebenen
Profilgröße 1	L 180x16	L 130x12
Länge	6,5m	6,5m
Gewicht	282,75	153,3 kg
Profilgröße 2	-	L 70x7
Länge	-	12,66m
Gewicht	-	93,4 kg
Σ Gewicht	282,75	246,8

Tabelle 15: Gewichtsermittlung der Verbände an der Schnabelspitze

Die Wahl einer zweiten Ebene ist aus Sicht des Materialverbrauchs und der zu erwartenden Verformungen am Vorbauschnabelhauptträger nicht zwingend notwendig, da die aufgezeigten Unterschiede bei der Wahl des Profils L180x16 bei einer Ebene vergleichsweise gering ausfallen.

6.2.4 Fazit und Festlegungen

Abschließend zu den Untersuchungen der Verbandsfelder und Ebenen lässt sich feststellen, dass eine ungünstige Wahl der Verbandsfeldgröße, sowohl die Schnittkräfte in den Verbänden und im Hauptträger, als auch Verformungen ungünstig beeinflussen kann. Eine sinnvolle Abwägung zwischen Fertigungs- und Materialaufwand der Verbände, sowie die unterschiedlichen Auswirkungen auf die Hauptträgerstruktur und die damit möglicherweise bemessungsrelevanten Unterschiede sollten bedacht werden. Insbesondere bei Vorbauschnabelkonstruktionen mit deutlich größeren Abmessungen als die hier vorliegenden, ist eine derartige Untersuchung in Betracht zu ziehen.

Als Basis für die weiteren Untersuchungen werden eine Verbandsanzahl von zwei Feldern, sowie eine zweite Verbandsebene an der Schnabelspitze festgelegt. Die dafür zugrunde gelegten Verbandsprofile, in der Materialfestigkeit S235, sind nachfolgend nochmals genannt:

Koppelstangen am Untergurt:	L 130x12
Zweite Ebene an der Schnabelspitze:	L 70x7
Diagonalen:	L 80x7

Aufgrund der konstruktiven Ausbildung der Verbandsebene an der Schnabelspitze ist es erforderlich, die Höhe des Hauptträgers mit 450mm zu definieren.

6.3 Nachweis der Tragsicherheit

Die Bemessung der Hauptträgerstruktur erfolgt unter dem Gesichtspunkt der Tragsicherheit sowie der Gebrauchstauglichkeit. Zunächst werden zur Sicherstellung der Tragfähigkeit folgende Nachweise erbracht:

- Nachweis globaler Spannungen
 - Spannung infolge Lasteinleitung der Zuglasche
 - Schubspannung im Stegblech
 - Spannung im Obergurt
 - Spannung im Untergurt
- Nachweis lokaler Spannungen
 - Spannung am Untergurt
 - Spannung infolge konzentrierte Lasteinleitung
- Stabilitätsnachweise
 - Nachweis der Beulsicherheit
 - Nachweis Biegedrillknicken

Die Trennung von globalen und lokalen Spannungen ist hier nur möglich, da die jeweiligen Maximalwerte in keiner gemeinsamen Stelle zusammenfallen und somit keine Überlagerung erfolgen muss.

6.3.1 Nachweis der globalen Spannungen

Um den Nachweis der globalen Spannung zu erbringen, sollen die statisch relevanten Stellen für die Bemessung aufgezeigt und die Abhängigkeiten der einzelnen Parameter dargelegt werden. Entsprechende konstruktive Maßnahmen werden bei Überschreitung der Beanspruchbarkeit vorgestellt und für die unterschiedlichen Varianten hinsichtlich ihrer Ausbildung und Abmessungen definiert.

6.3.1.1 Spannung infolge Lasteinleitung der Zuglasche

Wie bereits in den konstruktiven Grundsätzen in Kapitel 3.4 erwähnt, erfolgt der Anschluss des Vorbauschnabels an den Brückenfußpunkt am Obergurt des Versteifungsträgers sowie am Fahrbahnblech. Demzufolge befindet sich die Zuglasche am VBS nicht am Untergurt, sondern auf Höhe der Fahrbahn. Dies bedeutet, dass die Zuglasche in den Steg eingeschweißt wird. Dazu wird das Stegblech ausgeklinkt und die Zuglasche eingesteckt. Dies erlaubt ein Anschweißen mit umlaufender Kehlnaht, wodurch die Fertigung vereinfacht wird.

FEM-Berechnung

In diesem Abschnitt soll auf den Einfluss der Stegdicke auf die Lasteinleitungslänge der Zuglasche, sowie auf die Aufdickung im Stegbereich eingegangen werden. Zunächst soll anhand der Abbildung 70 und Abbildung 71 der Spannung σ_x und der Schubspannung die Forderung nach einer Stegverstärkung sowie einer ausreichenden Lasteinleitungslänge der Zuglasche aufgezeigt werden.

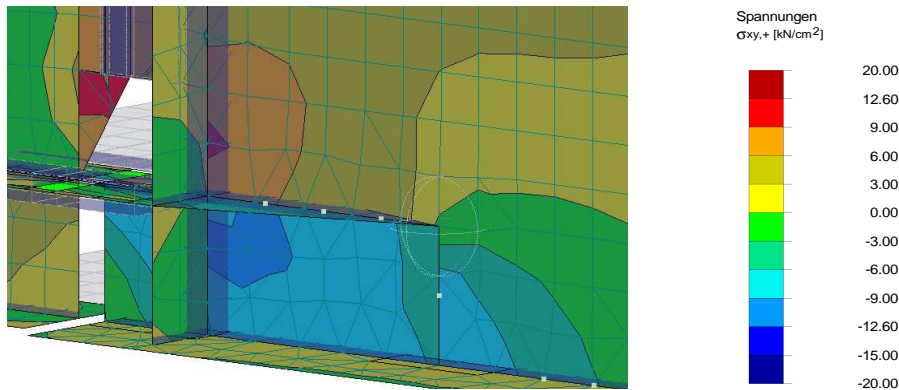


Abbildung 70: Schubspannungskonzentration im Stegblech unterhalb der Zuglasche

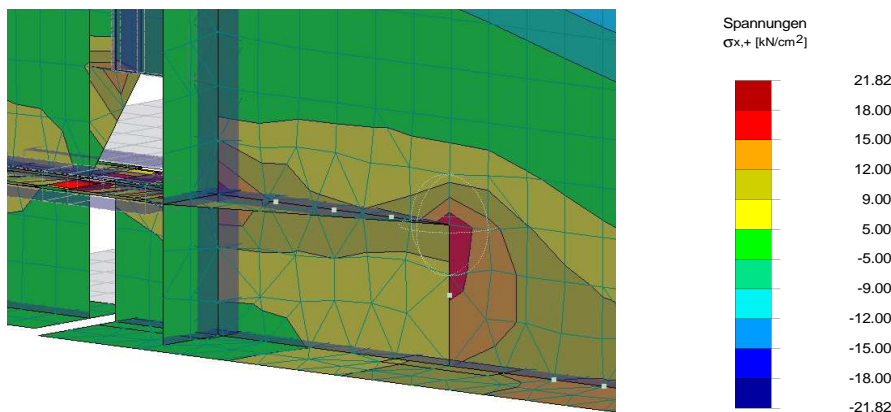


Abbildung 71: Normalspannungskonzentration im Bereich der Zuglasche

In der ersten der beiden Abbildungen ist deutlich der Bereich mit einer erhöhten Schubspannung im Steg zwischen Untergurt und Zuglasche zu erkennen. Dies resultiert aus der Umlagerung der Biegemomente, da die Zugnormalkraft vom Untergurt im Anschlussbereich von der Zuglasche aufgenommen werden muss. Diese Differenz der Normalkräfte wird in Form von Schubspannungen vom Steg aufgenommen. Aufgrund der hohen Auslastung ist bei Unterschreitung einer Grenzstegblechdicke eine Aufdickung im Anschlussbereich vorzusehen, um die Stegdicke für den restlichen Querschnitt minimieren zu können. Die Grenzdicke liegt für S235 bei 22mm und für S355 bei 15mm.

Weiterhin muss die Spannung im Bereich der Zuglasche beachtet werden. Die Größe der Spannung ist dabei vom Verhältnis zwischen Stegdicke und Lasteinleitungslänge abhän-

gig. Je dünner der Steg ausgeführt wird, desto weniger Fläche steht zur Aufnahme der Zugnormalkraft zur Verfügung. Aus diesem Grund muss die Länge der Lasteinleitung für jede Stegdicke individuell ermittelt werden.

Die Schubspannung im Steg und Spannung aus Lasteinleitung werden im Vergleichsspannungsnachweis zusammengefasst. Die Vergleichsspannung ist anhand der nachfolgenden Abbildung 72 dargestellt. Vor allem die Spannungskonzentration im Bereich der Zuglasche ist darin gut zu erkennen. Die Ergebnisse der Vergleichsspannung werden als maßgebend für die Auslegung der Lasteinleitungslänge betrachtet. Als maßgebende Laststellung wird die Einwirkung an der Schnabelspitze bei $x=0\text{m}$ angesehen.

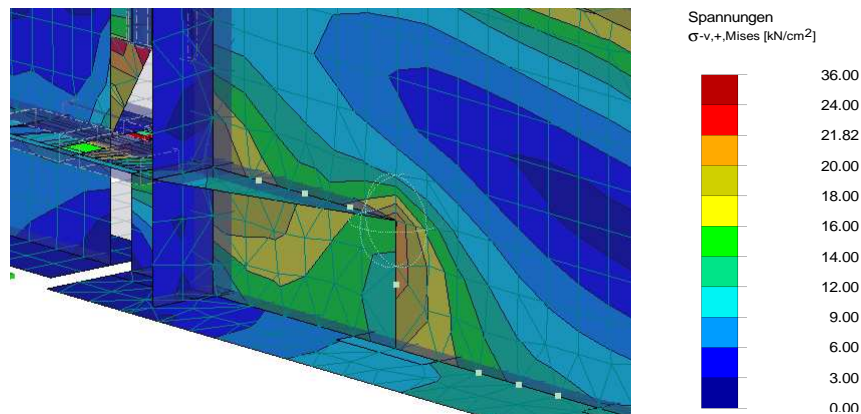


Abbildung 72: Spannungsverlauf der Vergleichsspannung im Stegblech im Bereich der Zuglasche

Zunächst soll aufgezeigt werden, welche Parameter außer der Stegdicke ebenfalls einen Einfluss auf die Festlegung der Lasteinleitungslänge ausüben. Die in den folgenden Tabelle 16 aufgelisteten Werte für die Vergleichsspannung beziehen sich dabei auf den Punkt am Ende der Zuglasche.

• Einfluss bei veränderlicher Dicke des Obergurts

Dicke Obergurt [mm]	σ_v [kN/cm ²]	Abweichung $\sigma_{v(t=30\text{mm})}/\sigma_{v(t)}$
35	12,37	0,60 %
30	12,30	-
25	12,21	0,74 %
20	12,11	1,60 %

Tabelle 16: Einfluss der Dicke des Obergurts auf die Spannungen im Stegblech

Der Einfluss der untersuchten Dicken auf die Spannung ist vernachlässigbar gering, daher wird für die folgenden Untersuchungen eine Dicke von 30mm für den Obergurt festgelegt.

• Einfluss bei veränderlicher Dicke des Untergurts

Dicke Untergurt [mm]	σ_v [kN/cm ²]	Abweichung $\sigma_{v(t=20mm)}/\sigma_{v(t)}$
30	10,71	14,8 %
25	11,4	7,9 %
20	12,30	-
15	13,52	9,0 %

Tabelle 17: Einfluss der Dicke des Untergurts auf die Spannungen im Stegblech

Der Einfluss bei veränderlicher Dicke des Untergurts nach Tabelle 17 auf die Spannungen ist nicht mehr vernachlässigbar und ist daher bei der Bestimmung der Lasteinleitungslänge zu berücksichtigen. Begründet werden kann dies damit, dass bei Auflösung des Biegemoments die Größe der Zugnormalkräfte im Untergurt sowie in der Zuglasche von der Schwerpunktslage abhängig ist. Dadurch wird die Differenz der Normalkräfte beeinflusst, was sich wiederum auf die Spannungen auswirkt.

In der nachfolgenden Tabelle 18 ist die Lasteinleitungslänge in Abhängigkeit der Steg- und Untergurtdicke aufgelistet. Die Länge der Zuglasche, beziehungsweise die Lasteinleitungslänge im Stegblech, wird dabei in Schritten zu je 100mm verändert. Die Dicke von 30mm des Untergurt für das Material in S355 wird nicht untersucht, da die Auslastung im Querschnitt als zu gering und damit als unwirtschaftlich angesehen wird.

		Lasteinleitungslänge in Abhängigkeit der Untergurtdicke [mm]			
	Stegdicke [mm]	$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
S 235	s = 22	800	800	900	900
	s = 15	1000	1000	1100	1100
	s = 12	1100	1100	1100	1200
	s = 10	1200	1300	1300	1400
	s = 8	1200	1300	1400	1600
S 355	s = 15	-	600	600	600
	s = 12	-	700	700	700
	s = 10	-	800	800	800
	s = 8	-	900	900	900

Tabelle 18: Lasteinleitungslänge im Stegblech nach FE-Methode

Analytische Berechnung

Anhand der nachfolgenden allgemeinen Formulierung wird die Ausbildung der Schubspannung im Stegbereich bei analytischer Berechnung wie folgt erfasst. Dabei ist die Lage des Gesamtschwerpunktes zur Erfassung des Spannungsverhältnisses zu berücksichtigen (siehe Abbildung 73).

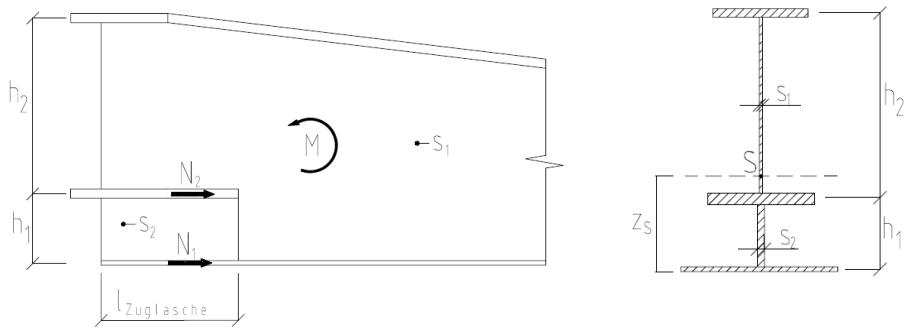


Abbildung 73: Grafik zum analytischen Nachweis der Lasteinleitung

$$N_1 = \frac{M/2}{(z_S)}; N_2 = \frac{M}{h_2}; \Delta N = N_2 - N_1$$

$$T = \frac{\Delta N}{h_1}; \tau_1 = \frac{T}{s_2} \quad \text{Schubspannung im Blech } s_2$$

$$\tau_2 = \frac{Q}{A_{\text{Steg}}} = \frac{Q}{h_2 \cdot s_1} \quad \text{Schubspannung im Blech } s_1$$

$$\sigma_{x,1} = \frac{N_2/2}{l_{\text{Zuglasche}} \cdot s_2}; \sigma_{x,2} = \frac{N_2/2}{l_{\text{Zuglasche}} \cdot s_1}$$

$$\sigma_{v,1} = \sqrt{\sigma_{x,1}^2 + 3 \cdot \tau_1^2}; \sigma_{v,2} = \sqrt{\sigma_{x,2}^2 + 3 \cdot \tau_2^2}$$

Die im Folgenden aufgestellte Tabelle 19 zeigt die Ergebnisse der analytischen Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche unter Beachtung der Steg- und Untergurtdicke. Die Berechnungen dafür können dem Anhang B 3 entnommen werden.

		Lasteinleitungslänge [mm]			
	Stegdicke [mm]	$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
S 235	s = 22	600	600	700	900
	s = 15	600	600	700	800
	s = 12	800	800	800	900
	s = 10	1000	1000	1000	1100
	s = 8	1200	1200	1200	1200
S 355	s = 15	-	500	500	600
	s = 12	-	600	600	600
	s = 10	-	700	700	700
	s = 8	-	800	800	800

Tabelle 19: Lasteinleitungslänge nach analytischer Berechnung

6.3.1.2 Schubspannung im Stegblech

Maßgebend für die Bestimmung der Schubspannung im Stegblech ist der minimale Querschnitt an der Schnabelspitze, da hier die geringste Stegfläche A_{Steg} zur Aufnahme der Querkraft zur Verfügung steht. Die Schubspannung wird im Folgenden für die unterschiedlichen Stegblechdicken bestimmt. Die Höhe der Schnabelspitze ist aufgrund der 2. Verbandsebene konstruktiv mit 450mm festgelegt.

FEM-Berechnung

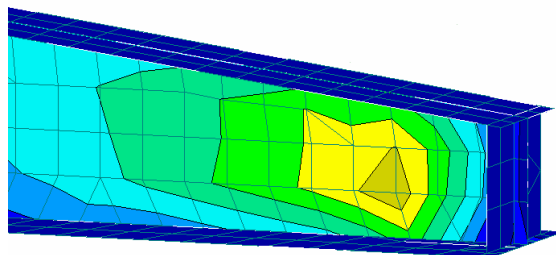


Abbildung 74: Schubspannungsverlauf an der Schnabelspitze nach FE-Methode

	s=22mm	s=15mm	s=12mm	s=10mm	s=8mm	Einheit
τ	4,50	6,70	8,20	9,90	12,10	kN/cm ²
$\tau / \tau_{R,d,S235}$	0,36	0,53	0,65	0,78	0,96	-

Tabelle 20: Schubspannung im Stegblech an der Schnabelspitze nach FE-Methode

Anhand von Tabelle 20 zeigt sich, dass selbst bei nur 8mm Stegblechdicke der Nachweis der Schubspannung für die Ausführung in S235 erfüllt ist. Auf die Überlagerung mit der Spannung σ_y infolge konzentrierter Lasteinleitung wird verzichtet, da an der Schnabelspitze planmäßig zum Anschluss der Verbände eine Steife positioniert ist, wodurch die vertikale Last von der Rippe aufgenommen wird.

Analytische Berechnung

Die Grundlage zur Ermittlung der Schubspannung lautet wie folgt:

$$\tau = \frac{Q \cdot S_y}{I_y \cdot s} \leq \tau_{R,d}$$

Vereinfacht kann die Berechnung erfolgen mit:

$$\tau = \frac{Q}{A_{\text{Steg}}} \leq \tau_{R,d}$$

Der vereinfachte Nachweis darf jedoch nur verwendet werden, wenn die Bedingung $A_{\text{Gurt}}/A_{\text{Steg}} > 0,6$ erfüllt ist. Anhand des vereinfachten Nachweises zeigt sich, dass die Gurt-dickenverhältnisse keinen Einfluss auf die Schubspannung im Stegbereich ausüben, da sich das Verhältnis zwischen Flächenmoment 1.Grades und 2.Grades für unterschiedliche Gurt-dickenabmessungen im gleichen Verhältnis ändert.

Die Nachweisstelle für die Spannungsermittlung wird bei $x=0,21\text{m}$ definiert, da dies die Mitte des Verschublagers darstellt. Die Querschnittshöhe an dieser Stelle beträgt 474,2mm bei einer wirkenden Querkraft von 443 kN. Zur Bestimmung der Querschnittswerte wird der Obergurt mit 35mm und der Untergurt mit 25mm definiert.

	s=22mm	s=15mm	s=12mm	s=10mm	s=8mm	Einheit
Q	443	443	443	443	443	kN
S_y	3957	3785	3710	3659	3609	cm ³
I_y	167362	162481	160356	158927	158585	cm ⁴
τ	4,76	6,88	8,54	10,20	12,60	kN/cm ²
τ / τ_{R,d,S235}	0,38	0,55	0,68	0,81	1,00	-

Tabelle 21: Schubspannung im Stegblech nach analytischer Berechnung

Hinsichtlich der Schubspannung nach Tabelle 21 besteht keine Einschränkung bezüglich der Wahl des Stegmaterials. Selbst bei 8mm Dicke ist die Ausführung in S235 denkbar.

6.3.1.3 Spannung im Obergurt

Um Materialeinsparungen an der Vorbauschnabelkonstruktion zu erzielen, besteht unter anderem die Möglichkeit, die Obergurtdicke zu reduzieren. Da dieser jedoch insbesondere im Anschlussbereich zur Drucklasche hinsichtlich der Spannungen lokal stark ausgelastet ist, ist an dieser Stelle eine Aufdickung mit entsprechender Länge vorzusehen. Untersucht wird dabei, für welche Obergurtdicken Aufdickungen vorzusehen sind und welche Abmessung diese aufweisen müssen.

FEM-Berechnung

Zunächst soll anhand der nachfolgenden Abbildung 75 das Problem der Spannungsüberschreitung im Obergurt und damit die Notwendigkeit einer Aufdickung mit entsprechender Länge aufgezeigt werden.

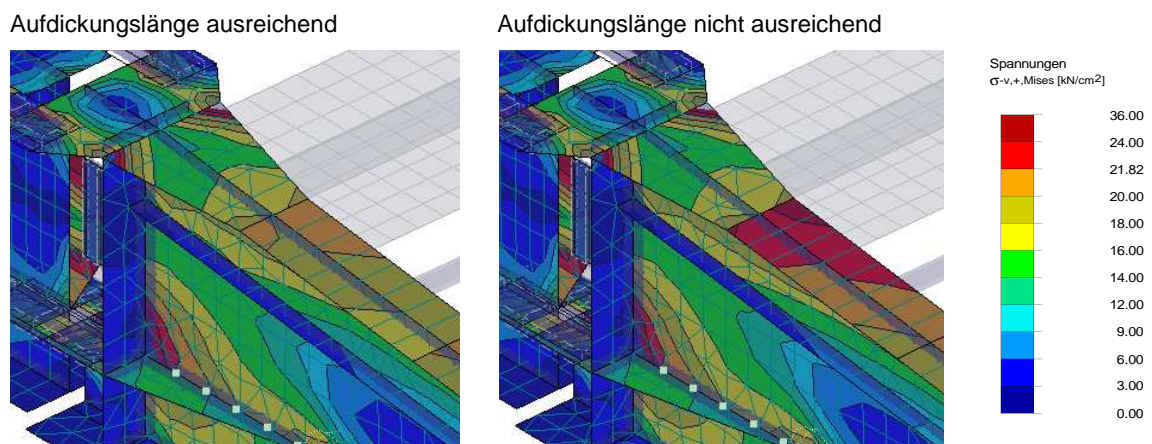


Abbildung 75: Vergleichsspannung im Obergurt

Zunächst wird anhand des Diagramm 4 dargestellt, wie die Spannung im Obergurt ohne Aufdickung unter Beachtung verschiedener Steg- und Obergurtdickenkombinationen verläuft, um daraus abzuleiten, für welche Varianten eine Aufdickung erforderlich wird.

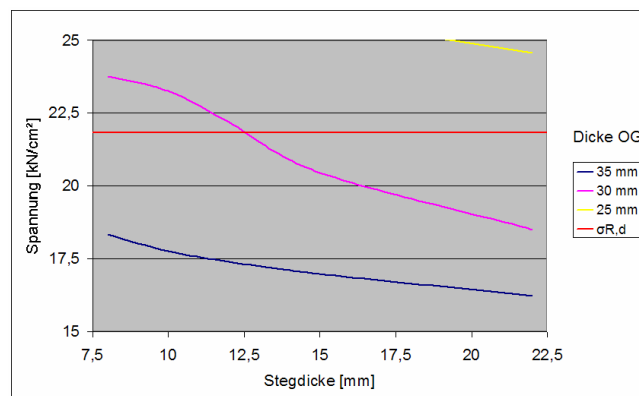


Diagramm 4: Spannung im Obergurt für S235

Anhand von Diagramm 4 ist ersichtlich, dass bereits bei einer Dicke des Obergurts von 30mm und einem Stegblech von 12mm Stärke die Spannung in S235 lokal überschritten ist. Eine weitere Verringerung der Obergurtdicke führt bei allen untersuchten Stegdicten stets zu einer Spannungsüberschreitung. Daher ist bei diesen Varianten eine Aufdickung des Obergurts vorzusehen. In Tabelle 22 ist aufgelistet, welche Länge die Aufdickung aufweisen muss, damit die Grenzspannung von 21,82 kN/cm² eingehalten wird. Die Stärke der Aufdickung wird stets mit 35mm festgelegt. Gleichzeitig findet eine Verbreiterung bis zum Übergang an die Drucklasche auf 500mm statt.

Für S355 nach Diagramm 5 ist nur bei einer Obergurtdicke von 15mm und einer Stegdicke von 10mm und 8mm eine Aufdickung erforderlich.

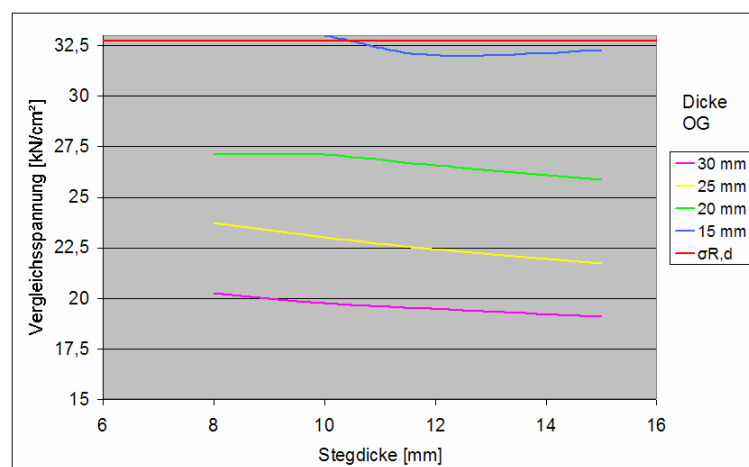


Diagramm 5: Spannung im Obergurt in S355

• Aufdickung im Obergurt für die Ausführung in S235

		Länge der Aufdickung im Obergurt				
		$t_{OG}=35\text{mm}$	$t_{OG}=30\text{mm}$	$t_{OG}=25\text{mm}$	$t_{OG}=20\text{mm}$	$t_{OG}=15\text{mm}$
Stegdickte	22mm	keine	keine	500 mm	750 mm	- ¹⁾
	15mm	keine	keine	500 mm	1000 mm	- ¹⁾
	12mm	keine	250 mm	500 mm	1700 mm	- ¹⁾
	10mm	keine	500 mm	750 mm	- ¹⁾	- ¹⁾
	8mm	keine	500 mm	750 mm	- ¹⁾	- ¹⁾
¹⁾ Auslastung im Obergurt zu hoch, Variante nicht möglich						

Tabelle 22: Länge der Aufdickung im Obergurt für S235 nach FE-Methode

Für die Obergurtdicken von 20mm in Kombination mit 10mm und 8mm Stegblech, sowie bei allen 15mm starken Obergurten sind keine Werte aufgelistet, da bei diesen Varianten die spannungsmäßige Auslastung in großen Teilen des Querschnitts überschritten wird. Daher entfallen diese als mögliche Ausführung in S235. Für weitere Betrachtungen wird die Obergurtdicke von 15mm bei S235 daher nicht mehr betrachtet.

• Aufdickung im Obergurt für die Ausführung in S355

		Länge der Aufdickung im Obergurt			
		$t_{OG}=30\text{mm}$	$t_{OG}=25\text{mm}$	$t_{OG}=20\text{mm}$	$t_{OG}=15\text{mm}$
Stegdickte	15mm	keine	keine	keine	keine
	12mm	keine	keine	keine	1250 mm
	10mm	keine	keine	keine	1250 mm
	8mm	keine	keine	keine	1250 mm

Tabelle 23: Länge der Aufdickung im Obergurt für S355 nach FE-Methode

Die Länge der Aufdickungen bei 15mm Obergurt in S355 nach Tabelle 23 resultiert nicht nur aus der Einhaltung der Spannungen, sondern auch aus Gründen der Stabilität. Darauf wird jedoch erst im Kapitel Stabilitätsuntersuchung genauer eingegangen.

Analytische Berechnung

Zunächst soll ermittelt werden, für welche Gurtdicken in Abhängigkeit der Materialfestigkeit überhaupt eine Aufdickung notwendig wird und in welcher Dicke diese auszuführen ist. Maßgebend dafür ist der Querschnitt zwischen Zuglasche und Obergurt des Hauptträgers.

Analog zum FE-Modell wird die Breite der Aufdickung von 400mm auf 500mm im Anschluss zur Drucklasche aufgeweitet.

Um die Spannung im Obergurt zu bestimmen, wird als maßgebender Querschnitt die Stelle zwischen Zuglasche und Obergurt angesehen. Dabei ist bei der analytischen Berechnung insbesondere schwierig zu erfassen, dass die Spannungsumlagerung vom Gesamtquerschnitt auf den Querschnitt Obergurt/Zuglasche nicht schlagartig, sondern kontinuierlich stattfindet. Somit können die beiden Querschnittsstellen nur getrennt voneinander untersucht werden. Ist an der Nachweisstelle 1 (siehe Abbildung 76) die Spannung kleiner der Grenzspannung, so ist keine Aufdickung vorzusehen, anderenfalls ist die Länge gleich der Länge der Zuglasche (Lasteinleitungslänge) zu wählen. Ist an der Nachweisstelle 2 die Spannung kleiner der Grenzspannung, so kann die Aufdickungslänge als ausreichend angesehen werden, anderenfalls ist die Querschnittsstelle zu suchen, an der der Spannungsnachweis erfüllt ist und die Aufdickungslänge ist dementsprechend zu verlängern. Konstruktiv ist zu beachten, dass die Drucklasche bis zur Stelle $x=9,5\text{m}$ reicht. Erst ab diesem Punkt ist gegebenenfalls eine Aufdickung vorzusehen.

Berechnungsgrundlagen

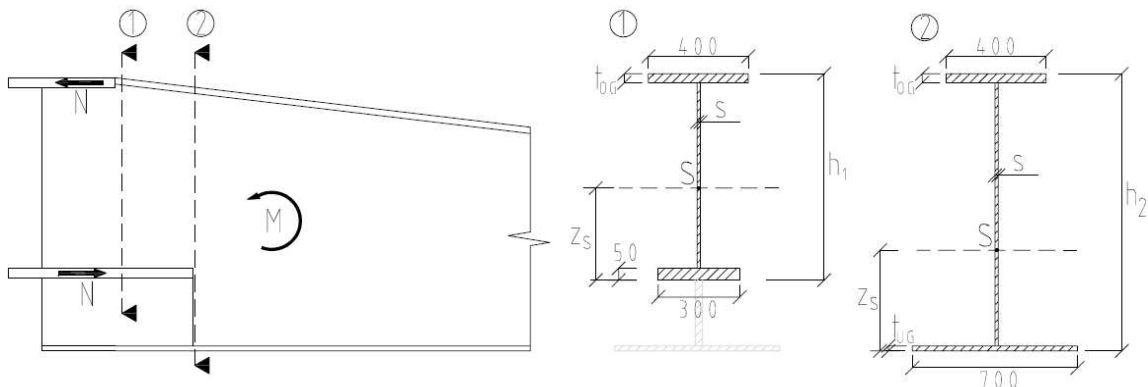


Abbildung 76: Nachweisstellen zur Bestimmung der Aufdickung im Obergurt

- Nachweisstelle 1 ($x=9,5\text{m}$)

$$\sigma_{OG} = \frac{M_{y(x=9,5\text{m})}}{I_y} \cdot (h_1 - z_S) \quad \text{mit } h_1=1235\text{mm und } M_{y(x=9,5\text{m})}=4170,5\text{kNm}$$

- Nachweisstelle 2 (x abhängig von Lasteinleitungslänge)

$$\sigma_{OG} = \frac{M_{y(x)}}{I_y} \cdot (h_2 - z_S)$$

Weiterhin ist besonders für die Nachweisstelle 2 die Einhaltung der b/t -Verhältnisse im Obergurt zu berücksichtigen, da somit ein volles Mittragen aller Querschnittsteile unter Druckbeanspruchung gewährleistet wird. Die Berechnung erfolgt für den Fall, dass die

größte Druckspannung am freien Rand anliegt. Da das Spannungsverhältnis $\psi=1,0$ ist, ist ebenso eine Berechnung für den Fall der größten Druckspannung am gelagerten Rand denkbar. Beide Berechnungsansätze führen in diesem Fall zum gleichen Ergebnis. Unter der Bedingung $\sigma_1 = \sigma_{R,d}$ ergibt sich:

$$\text{grenz}(b/t) = 305 \cdot \sqrt{\frac{0,57 - 0,21 \cdot \psi + 0,07 \cdot \psi^2}{\sigma_1 \cdot \gamma_M}}$$

$$\text{grenz}(b/t) = 305 \cdot \sqrt{\frac{0,57 - 0,21 \cdot 1,0 + 0,07 \cdot 1,0^2}{218,2 \cdot 1,1}} = 12,91 \rightarrow \text{S235}$$

$$\text{grenz}(b/t) = 305 \cdot \sqrt{\frac{0,57 - 0,21 \cdot 1,0 + 0,07 \cdot 1,0^2}{327,3 \cdot 1,1}} = 10,54 \rightarrow \text{S355}$$

Die Breite des Druckgurts mit 190mm ergibt sich für den ungünstigsten Fall mit $s=8\text{mm}$ und $a=6\text{mm}$.

	$t_{OG}=35\text{mm}$	$t_{OG}=30\text{mm}$	$t_{OG}=25\text{mm}$	$t_{OG}=20\text{mm}$	$t_{OG}=15\text{mm}$
vorh b/t	5,43	6,34	7,60	9,50	12,67
NW für S235	□	□	□	□	□
NW für S355	□	□	□	□	■
Legende: ■ Nachweis vorh (b/t) / grent (b/t) >1,0 □ Nachweis vorh (b/t) / grent (b/t) ≤1,0					

Tabelle 24: Nachweis der b/t-Verhältnisse im Druckgurt

Da der Nachweis der b/t-Verhältnisse (Tabelle 24) für $\sigma_1=\sigma_{R,d}$ für $t_{OG}=15\text{mm}$ in S355 nicht erfüllt ist, besteht entweder die Möglichkeit, einen genauen Beulsicherheitsnachweis nach DIN 18800-3 für eine dreiseitig gelagerte Platte zu erbringen oder die Spannung σ_1 soweit zu begrenzen, dass die b/t-Verhältnisse als erfüllt gelten. Die zweite Möglichkeit soll für diesen Fall genutzt werden. Bei der Bestimmung der Aufdickungslänge für die Kombination $t_{OG}=15\text{mm}$ in S355, gilt als Grenzspannung an der Stelle 2 nicht $\sigma_{R,d}$, sondern σ_1 .

$$\sigma_1 = \frac{0,57 - 0,21 \cdot \psi + 0,07 \cdot \psi^2}{\left(\frac{\text{grenz}(b/t)}{305}\right) \cdot \gamma_M} = \frac{0,57 - 0,21 \cdot 1,0 + 0,07 \cdot 1,0^2}{\left(\frac{12,67}{305}\right) \cdot 1,1} = 226,5 \text{ N/mm}^2 \hat{=} 22,65 \text{ kN/cm}^2$$

Ergebnisse

Zunächst wird die Nachweisstelle 1 untersucht, um zum einen zu schlussfolgern, ob eine Aufdickung erforderlich ist und mit welcher Materialstärke diese auszuführen ist. Die Berechnungen kann dem Anhang B 4 entnommen werden.

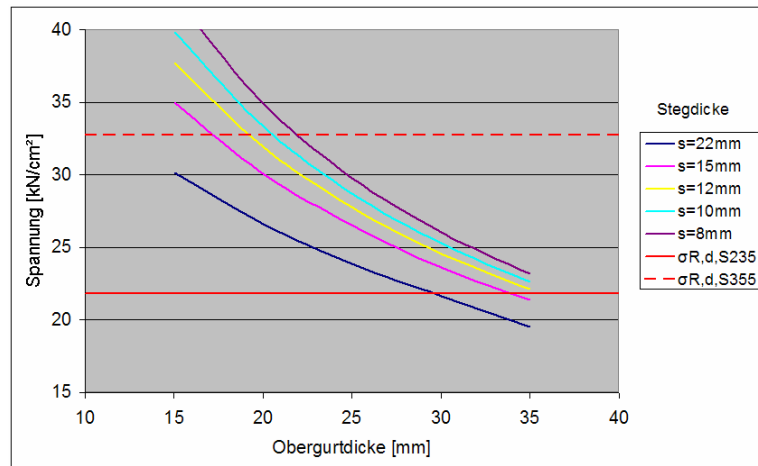


Diagramm 6: Spannung im Obergurt für S235 ohne Aufdickung für Nachweisstelle 1

Bei diesem Nachweis wird trotz einer geringen Spannungsüberschreitungen von 7% der Nachweis als erfüllt angesehen, da zu berücksichtigen ist, dass zum einen die Last kontinuierlich vom Gesamtquerschnitt in den Querschnitt Zuglasche/Druckgurt übergeht, zum anderen ist für die Breite der Zuglasche das Minimum von 300mm angesetzt worden, tatsächlich verbreitert sich diese zum Anschluss hin auf 1000mm. Diese beiden Tatsachen rechtfertigen, dass die Aufdickung für S235 mit 35mm und die für S355 mit 20mm ausgeführt werden kann.

Anhand der 2. Nachweisstelle (Diagramm 7) soll festgestellt werden, ob die Aufdickungslänge, welche analog zur Lasteinleitungslänge ausgeführt wird (siehe Kapitel 6.3.1.1) als ausreichend erscheint oder ob die Aufdickung zu verlängern ist.

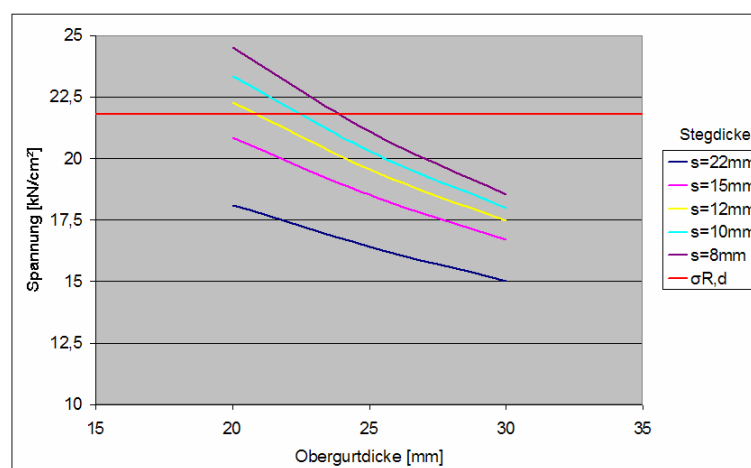


Diagramm 7: Spannung im Obergurt in S235 für Nachweisstelle 2

Bis auf die Varianten für $t_{OG}=20\text{mm}$ und $s=10$ sowie 8mm sind die Spannungen unterhalb der Grenzwertspannung. Da zum Erfüllen der beiden überschrittenen Varianten die Aufdickungslänge mehrere Meter Länge aufweisen müsste, dies jedoch als nicht sinnvoll er-

scheint, werden diese Varianten in S235 ausgeschlossen. Dies entspricht auch den Erkenntnissen aus der FE-Berechnung (vgl. mit Tabelle 22).

Eine Zusammenfassung der erforderlichen Aufdickungslängen für S235 und S355 wird in Tabelle 25 und Tabelle 26 gegeben.

• Zusammenfassung der Aufdickung im Obergurt für die Ausführung in S235

		Länge der Aufdickung im Obergurt				
		t _{OG} =35mm	t _{OG} =30mm	t _{OG} =25mm	t _{OG} =20mm	t _{OG} =15mm
Stegdickte	22mm	keine	keine	600 mm	600 mm	- ¹⁾
	15mm	keine	500 mm	500 mm	500 mm	- ¹⁾
	12mm	keine	600 mm	600 mm	600 mm	- ¹⁾
	10mm	keine	800 mm	800 mm	- ¹⁾	- ¹⁾
	8mm	keine	900 mm	900 mm	- ¹⁾	- ¹⁾
¹⁾ Auslastung im Obergurt zu hoch, Variante nicht möglich						

Tabelle 25: Länge der Aufdickung im Obergurt für S235 nach analytischer Berechnung

• Zusammenfassung der Aufdickung im Obergurt für die Ausführung in S355

		Länge der Aufdickung im Obergurt			
		t _{OG} =30mm	t _{OG} =25mm	t _{OG} =20mm	t _{OG} =15mm
Stegdickte	15mm	keine	keine	keine	4800 mm
	12mm	keine	keine	keine	5700 mm
	10mm	keine	keine	keine	6100 mm
	8mm	keine	keine	keine	6500 mm

Tabelle 26: Länge der Aufdickung im Obergurt für S355 nach analytischer Berechnung

Die großen Aufdickungslängen, welche unter Einhaltung der b/t-Verhältnisse zustande kommen, rechtfertigen nicht den Einsatz einer Obergurtdicke von 15mm. Somit würde die minimale Obergurtdicke für S355 nach analytischer Berechnung bei 20mm liegen.

6.3.1.4 Spannung im Untergurt

FEM-Berechnung

Auf die wirkenden Spannungen im Untergurt aus Sicht der globalen Wirkung soll in diesem Kapitel nur kurz eingegangen werden, da sich bei der FEM-Berechnung herausgestellt hat, dass für die zur Wahl stehenden Materialdicken die Grenzspannung für S235 von $21,82 \text{ kN/cm}^2$ stets eingehalten wird. Daher wird nur für die kleinstmöglichen Abmessungenkombinationen in S235 der grafische Nachweis mit Abbildung 77 und Abbildung 78 erbracht. Alle anderen Varianten, auch in S355, können demzufolge als offensichtlich erfüllt angesehen werden.

• Untergurt 15mm, Obergurt 20mm, Steg 12mm, S235

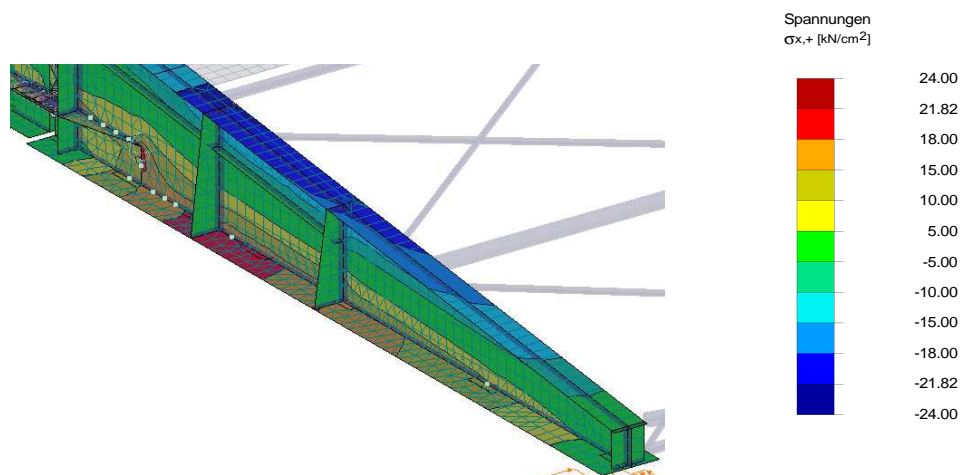


Abbildung 77: Spannung im Untergurt, Materialdickenkombination 1

• Untergurt 15mm, Obergurt 25mm, Steg 8mm, S235

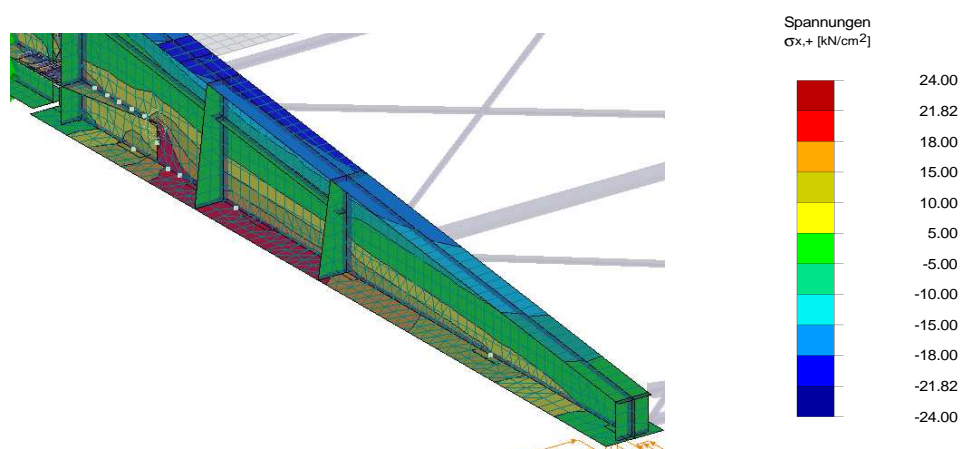


Abbildung 78: Spannung im Untergurt, Materialdickenkombination 2

Analytische Berechnung

Um den Nachweis der globalen Spannung am Untergurt aufzuzeigen, wird als maßgebende Nachweisstelle das Ende der Zuglasche gewählt. Dies entspricht der Nachweisstelle 2 nach Abbildung 76 im Kapitel 6.3.1.3 und ist demzufolge von der Lasteinleitungslänge der Zuglasche abhängig. Dabei gilt folgender Zusammenhang:

$$\sigma_{UG} = \frac{M_{y(x)}}{I_y} \cdot (z_S)$$

Tabelle 27 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen in Abhängigkeit der Obergurt- und Stegdicke. Für die Untergurtdicke wird stets das Minimum von 15mm vorausgesetzt. Die Berechnungen können im Anhang B 5 nachvollzogen werden.

		Spannungen im Untergurt				
		t _{OG} =35mm	t _{OG} =30mm	t _{OG} =25mm	t _{OG} =20mm	Einheit
s=22mm	σ_x	15,31	15,60	15,96	16,40	kN/cm ²
	$\sigma_x/\sigma_{R,d}$	0,70	0,72	0,73	0,75	-
s=15mm	σ_x	17,25	17,55	17,94	18,43	kN/cm ²
	$\sigma_x/\sigma_{R,d}$	0,79	0,80	0,82	0,84	-
s=12mm	σ_x	18,22	18,52	18,90	19,41	kN/cm ²
	$\sigma_x/\sigma_{R,d}$	0,84	0,85	0,87	0,89	-
s=10mm	σ_x	18,93	19,21	19,58	- ¹⁾	kN/cm ²
	$\sigma_x/\sigma_{R,d}$	0,86	0,88	0,89	- ¹⁾	-
s=8mm	σ_x	19,69	19,95	20,29	- ¹⁾	kN/cm ²
	$\sigma_x/\sigma_{R,d}$	0,90	0,91	0,93	- ¹⁾	-
¹⁾ Variante nach Tabelle 25 nicht möglich						

Tabelle 27: Spannung im Untergurt nach analytischer Berechnung

Die Ergebnisse zeigen, dass auch nach analytischer Berechnung eine maximale Auslastung von 93% vorliegt und somit alle Varianten aus Sicht der globalen Spannungen in S235 mit 15mm ausgeführt werden können. Auf die lokalen Spannungen im Untergurt wird im Kapitel 6.3.2.1 näher eingegangen.

6.3.2 Nachweis der lokalen Spannungen

Bei den Nachweisen für die lokale Spannung soll aufgezeigt werden, welchen Einfluss die direkte Einwirkung auf die unmittelbar angrenzenden Querschnittsteile ausübt und ob entsprechende konstruktive Maßnahmen, beispielsweise die Positionierung zusätzlicher Steifen, erforderlich wird.

6.3.2.1 Lokale Spannungen im Untergurt

Untersucht werden soll, welche Größe die Spannung am Untergurt infolge vertikaler und horizontaler Lasteinleitung erreicht. Eine Überlagerung mit globaler Wirkung ist dabei nicht erforderlich, da das Biegemoment an der jeweiligen Einleitungsstelle null ist.

FEM-Berechnung

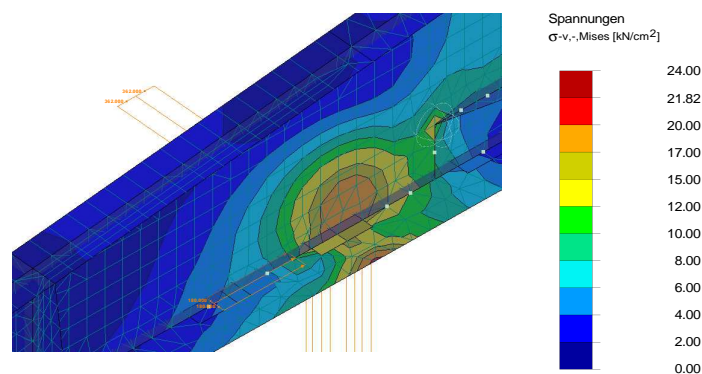


Abbildung 79: Lokale Spannung im Untergurt

Abbildung 79 zeigt, dass die Spannung aus konzentrierter Lasteinleitung an der Stelle $x=7,5\text{m}$ bei einer Dicke von 15mm im Untergurt, bei maximal 20kN/cm^2 liegt. Da diese Untergurtdicke der minimal wählbaren entspricht, wird darauf verzichtet, dickere Materialstärken zu untersuchen, da diese Nachweise als offensichtlich erfüllt anzusehen sind. Somit ist eine Ausführung des Untergurtblechs in den beiden Materialsorten, sowie in den Dicke 30mm bis 15mm, möglich.

Analytische Berechnung

Um die Spannung am Untergurt infolge Seitenführungskraft und vertikaler Auflast sinnvoll zu erfassen, wird der Ansatz im Petersen „Stahlbau“ [14] S. 903 nach SAHMEL verwendet. Für die Größe R , die laut Literatur [14] die Radlast darstellt, wird die Resultierende der Auflagerreaktion des Verschlusslagers angesetzt. Zur Bestimmung der Spannung im Untergurt wird eine „mitttragende Flanschlänge l “ nach **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bestimmt, um damit das Widerstandsmoment W zu errechnen. Dabei

ist zu berücksichtigen, dass bei den Gleichungen und Abbildungen die Last in nur einem Punkt angreift. Aufgrund der Länge des Verschublagers von 42cm werden diese zu der mittragenden Länge addiert. Der Ansatz zur Berechnung lautet dann wie folgt:

$$W = \frac{I \cdot t_{UG}^2}{6}; \quad M = F \cdot c \quad (c = \text{Abstand von Außenkante Steg zur Einwirkungsstelle})$$

$$\sigma_y = \frac{M}{W}; \quad \sigma_x = \mu \cdot \sigma_y = 0,3 \cdot \sigma_y; \quad \sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y}$$

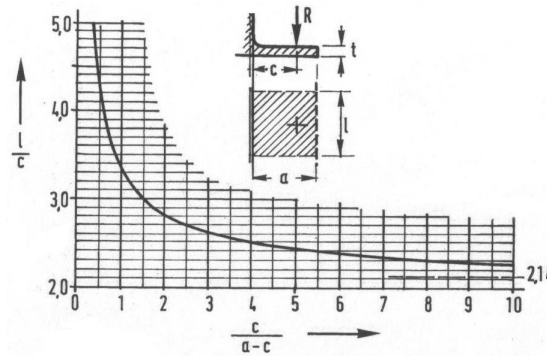


Diagramm 8: Bestimmung der Unterflanschbiegung nach SAHMEL [14]

Zur Bestimmung der lokalen Spannung wird die kleinstmögliche Stegdicke von 8mm vorausgesetzt. Als Laststellung wird die Stelle $x=7,5\text{m}$ mit einer Einwirkung von 571kN untersucht. Somit ergibt sich:

$$\frac{c}{(a-c)} = \frac{41}{(350-41)} = 0,13 \rightarrow \frac{l}{c} = 6,0 \text{ (nach Diagramm 8)}$$

$$l = (8,0 \cdot 4,1) + 42 = 74,8\text{cm}$$

Zur Festlegung der Einwirkungsgröße ist zu berücksichtigen, dass ein Teil der Last direkt vom Steg aufgenommen wird. Die Breite dafür wird mit $b'=s+2 \cdot a$ definiert. Weiterhin ist die planmäßige Außermittigkeit des Verschublagers von 10mm zu berücksichtigen. Anhand der Abbildung 80 kann die Aufteilung der Einwirkung zur Bestimmung der Spannung am Untergurt wie dargestellt erfolgen.

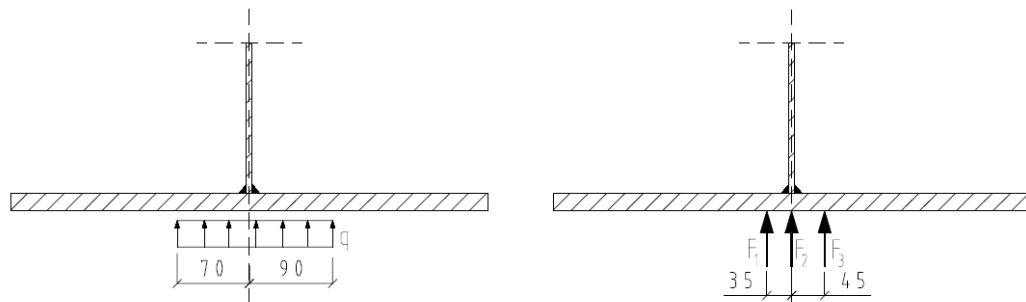


Abbildung 80: Aufteilung der Einwirkung zur Bestimmung der Unterflanschspannung

Die Einwirkungsgrößen werden wie folgt aufgeteilt:

$$q = 3568,7 \text{ kN/m} \text{ (entspricht } F_z = 571 \text{ kN an der Stelle } x = 7,5)$$

$$F_1 = 3568,7 \cdot (0,070 - (0,008 + 2 \cdot 0,006) / 2) = 214 \text{ kN}$$

$$F_2 = 3568,7 \cdot (0,008 + 2 \cdot 0,006) = 71,4 \text{ kN} \text{ (Anteil, der vom Steg aufgenommen wird)}$$

$$F_3 = 3568,7 \cdot (0,090 - (0,008 + 2 \cdot 0,006) / 2) = 285,5 \text{ kN} \text{ (maßgebende Einwirkung)}$$

$$M = F \cdot c = 285,5 \cdot 4,1 = 1170 \text{ kNcm} \text{ (maßgebendes Biegemoment)}$$

	t _{UG} = 30mm	t _{UG} = 25mm	t _{UG} = 20mm	t _{UG} = 15mm	Einheit
W	112,2	77,92	49,87	28,05	cm ³
σ_y	10,43	15,02	23,46	41,71	kN/cm ²
σ_x	3,13	4,50	7,04	12,51	kN/cm ²
σ_v	9,27	13,35	20,85	37,08	kN/cm ²
σ_v / σ_{R,d,S235}	0,42	0,62	0,96	1,70	-
σ_v / σ_{R,d,S355}	0,28	0,41	0,64	1,13	-

Tabelle 28: Lokale Spannung im Untergurt nach analytischer Berechnung

Anhand von Tabelle 28 zeigt sich, dass bei einer Untergurtdicke von 15mm selbst eine Ausführung in S355 nach analytischer Berechnung nicht mehr ausreicht. Hingegen ist eine Ausführung mit 20mm in S235 denkbar. Dieses Ergebnis weicht stark von der FE-Berechnung ab. Darauf wird im Kapitel 9.3 genauer eingegangen.

6.3.2.2 Konzentrierte Lasteinleitung im Stegblech

FEM-Berechnung

Die Größe der Spannung für den Nachweis der konzentrierten Lasteinleitung lässt sich nur sehr schwierig beschreiben, da die Spannungsmaxima an jeweils unterschiedlichen Stellen auftreten. Daher wird anhand der Tabelle 29 und der damit verbundenen Abbildung 81 die Lasteinleitung anhand der Vergleichsspannung, grafisch für ausgewählte Varianten dargestellt. Somit lässt sich qualitativ eine Aussage der zu erwartenden Spannungen treffen.

		Stegdicke		
		12mm	10mm	8mm
Dicke UG	25mm	#1	#2	#3
	20mm	#4	#5	#6
	15mm	#7	#8	#9

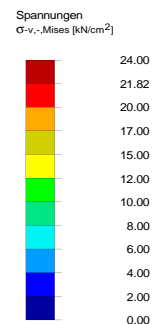


Tabelle 29: Bezeichnung der zugehörigen Abbildungen

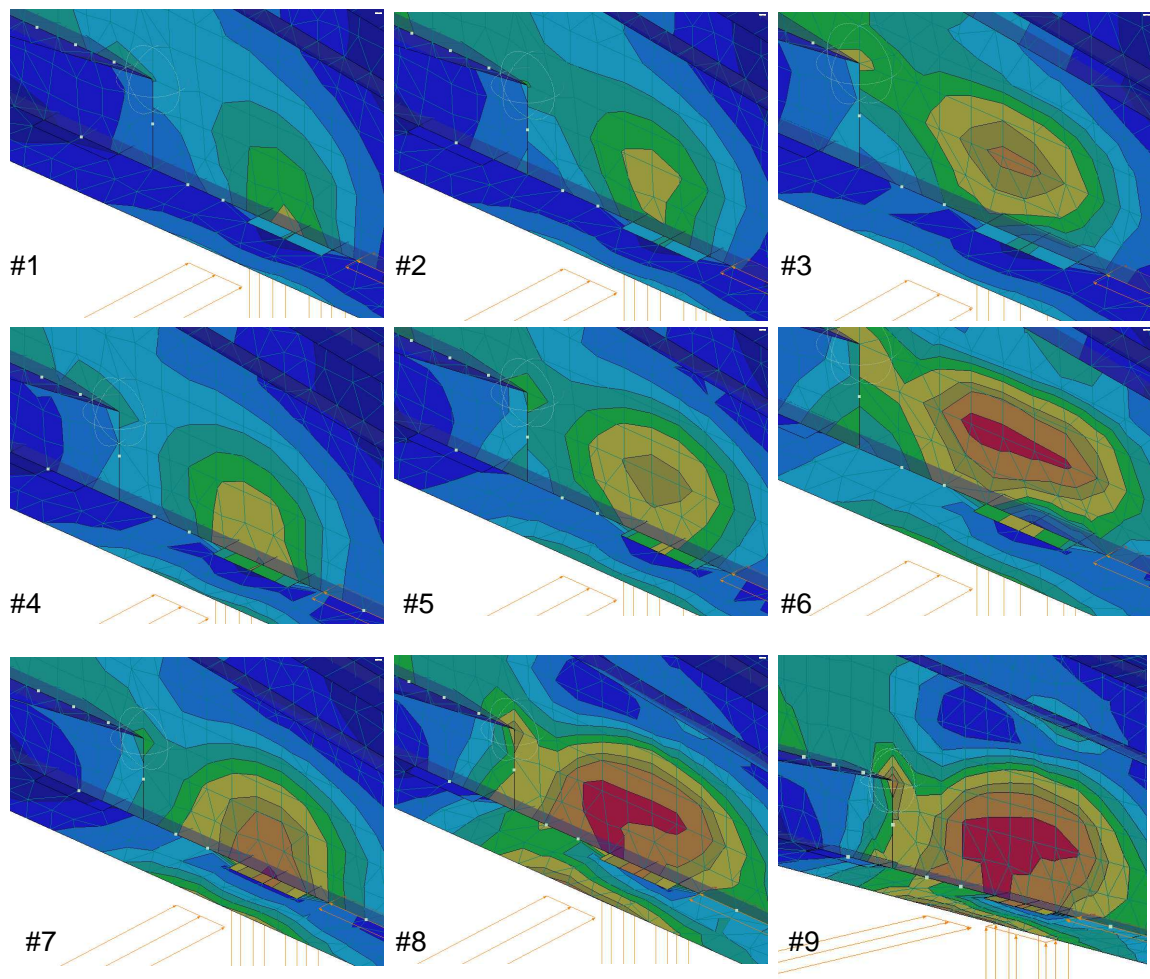


Abbildung 81: Konzentrierte Lasteinleitung im Stegblech nach FE-Methode

Anhand der Abbildung 81 der Vergleichsspannung ist gut zu erkennen, welchen Einfluss eine veränderliche Untergurtdicke, sowie eine veränderliche Stegdicke auf den Spannungsverlauf infolge konzentrierter Lasteinleitung nimmt. Die Flanschdicke beeinflusst dabei die Größe der wirkenden Spannung, die Ausbreitung bleibt jedoch weitestgehend auf den Bereich direkt um die Einwirkungsfläche begrenzt. Weiterhin befindet sich das Spannungsmaximum an der Kontaktfläche Steg – Untergurt. Der größere Anteil der Vergleichsspannung resultiert dabei aus der Normalspannung σ_z .

Eine Verringerung der Stegdicke hingegen führt zum Anwachsen der Spannung, jedoch wird gleichzeitig das Spannungsmaximum in Stegmitte verlagert. Dies ist damit zu Begründen, dass bei geringer Stegblechdicke der Anteil der Schubspannung im Bezug auf die Vergleichsspannung zunehmend maßgebend wird.

Grundsätzlich ist jedoch festzustellen, dass bei allen Stegblechdicken die maximale Spannung jeweils unterhalb der Grenzspannung von 21,82kN/cm² für S235 liegt. Somit sind aus Sicht der konzentrierten Lasteinleitung keine Einschränkungen gegeben.

Analytische Berechnung

Die Grundlage für den Nachweis der konzentrierten Lasteinleitung bildet DIN 18800-1 Element 744. Darin ist die Lasteinleitung wie folgt definiert:

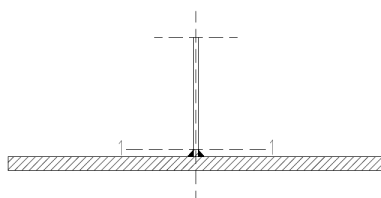
$$F_{R,d} = \frac{1}{\gamma_M} \cdot s \cdot l \cdot f_{y,k} \quad \text{mit} \quad l = c + 5 \cdot (t + a)$$

Um die Spannung σ_y zu ermittelt, ist die Gleichung entsprechend umzustellen:

$$\sigma_z = \frac{F_d}{s \cdot l} \quad \text{mit} \quad l = c + 5 \cdot (t + a)$$

Die Lastausbreitung ist mit einem Verhältnis von 1:2,5 angegeben. Dabei tritt die maßgebende Spannung am Ende des Radius bei Walzprofilen, beziehungsweise am Ende der Halsnaht bei Schweißprofilen auf.

Um eine Gegenüberstellung mit den FEM-Ergebnissen zu führen, ist ebenfalls die Größe der Vergleichsspannung zu ermitteln. Dazu ist es erforderlich, die Spannung σ_z mit der Schubspannung infolge Querkraft im Schnitt 1-1 (Oberkante Halsnaht) zu überlagern.



$$\tau_{\max} = \frac{Q \cdot S_{1-1}}{I_y \cdot s}$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_z^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

Abbildung 82: Schnitt 1-1

In Abhängigkeit der Untergurt- und Stegdicke sind die Ergebnisse in Tabelle 30 zusammengefasst. Die Berechnung ist dem Anhang B 6 zu entnehmen.

		Spannung σ_z [kN/cm ²]				
		s=22mm	s=15mm	s=12mm	s=10mm	s=8mm
Dicke UG	30mm	5,29	7,90	9,93	11,98	15,02
	25mm	5,35	8,00	10,08	12,16	15,28
	20mm	5,41	8,10	10,23	12,36	15,54
	15mm	5,47	8,20	10,36	12,53	15,79

Tabelle 30: Vergleichsspannung infolge konzentrierter Lasteinleitung

Aus Tabelle 30 ist ersichtlich, dass die Untergurtdicke auf die Spannung σ_z nur einen sehr geringen Einfluss ausübt. Die Begründung liegt in der großen Verschublagerfläche, die den Wert c beschreibt, wodurch sich die mittragende Länge l nur geringfügig ändert. Somit verändert sich bei konstanter Stegdicke die Fläche, auf die die Last einwirkt, ebenfalls nur gering. Bei einer deutlich kleineren Verschublagerfläche würden sich diese Verhältnisse ändern, sodass die Spannung stärker von der Untergurtdicke beeinflusst wird. Im Gegensatz dazu führt eine Verringerung der Stegdicke zu einer deutlichen Spannungserhöhung, da so eine deutlich geringere Fläche zur Aufnahme der Kraft zur Verfügung steht.

Allgemein ist jedoch zu erkennen, dass die maximale Spannung von 15,79kN/cm² zu einer Auslastung von 72% bei S235 führt. Somit sind keine zusätzlichen aussteifenden Maßnahmen zur Reduzierung der Spannung σ_z erforderlich.

6.3.3 Zusammenfassung globaler und lokaler Spannungen

Exemplarisch soll am Beispiel einer Abmessungskombination, stellvertretend für alle anderen Varianten, eine Zusammenfassung der Spannungsverläufe (siehe Abbildung 83 bis Abbildung 85) unter Beachtung der entsprechenden konstruktiven Maßnahmen und Einhaltung der Spannungen erfolgen. Folgende Variante wird dabei vorgestellt:

Material:	S235	
Stegdicke s:	12mm	
Untergurtdicke t_{UG} :	20mm	
Obergurtdicke t_{OG} :	15mm	
Lasteinleitungslänge:	1200mm	(nach Tabelle 18)
Aufdickungslänge Obergurt:	1700mm	(nach Tabelle 22)

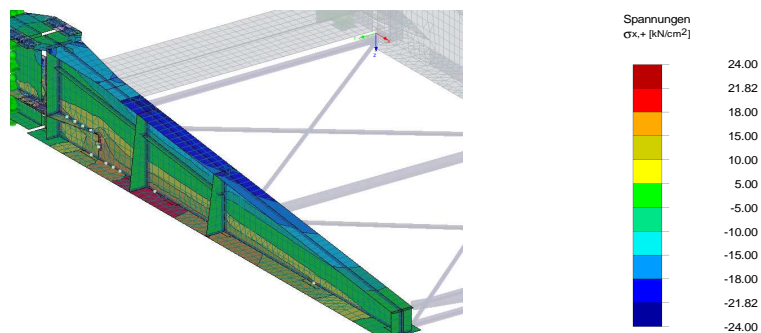


Abbildung 83: Spannungsverlauf der Normalspannung σ_x

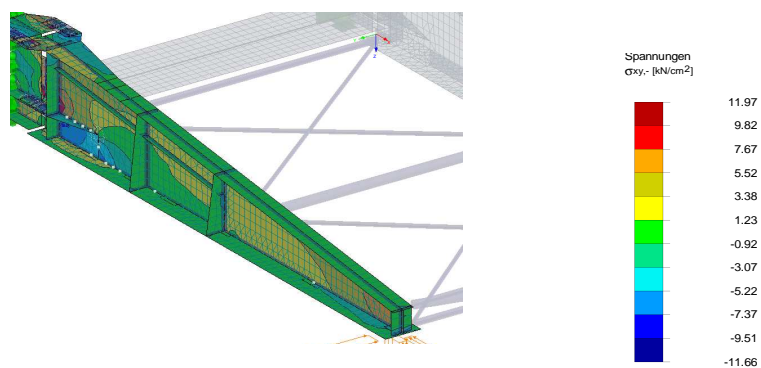


Abbildung 84: Spannungsverlauf der Schubspannung τ

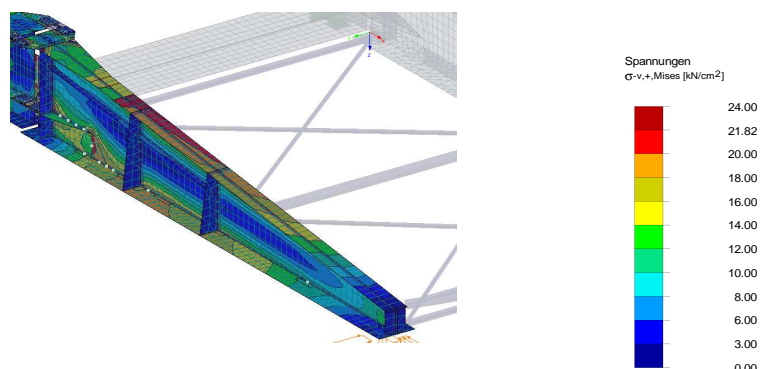


Abbildung 85: Spannungsverlauf der Vergleichsspannung σ_v

6.3.4 Stabilitätsuntersuchung

Nachdem alle maßgebenden Stellen hinsichtlich des Spannungsverhaltens ausführlich untersucht und nachgewiesen wurden, ist die Betrachtung der Stabilität als weiterer Punkt zum Nachweis der Tragsicherheit zu erbringen. Als Nachweise sind dabei sowohl der Beulsicherheitsnachweis nach DIN 18800-3 sowie der Biegedrillknicknachweis nach DIN 18800-2 gefordert. Auf den Nachweis des Biegeknickens kann verzichtet werden, da nach DIN 18800-2 (312) die vorhandene Normalkraft kleiner 10% der Normalkraft im plastischen Zustand ist.

6.3.4.1 Nachweis der Beulsicherheit

FEM-Berechnung

Bei dieser Form des Stabilitätsversagens kommt es zum Ausbeulen des Stegbleches. Demzufolge ist das Versagen hinsichtlich der Konstruktion hauptsächlich von der Dicke des Stegbleches abhängig. Jedoch haben auch andere Faktoren Einfluss auf den Beulsicherheitsnachweis. Diese werden im Folgenden ausführlich erläutert. Weiterhin werden konstruktive Gegenmaßnahmen bei maßgebendem Beulversagen vorgestellt und deren Wirkung auf die Stabilität des Systems aufgezeigt. Die untere Abbildung 86 zeigt die Darstellung der Beulgefährdung im Stegblech nach der FE-Methode.

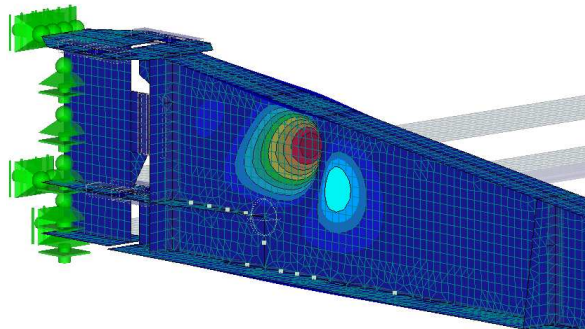


Abbildung 86: Darstellung der Beulgefährdung im FEM

Es soll noch einmal darauf aufmerksam gemacht werden, dass sich aufgrund der Anordnung von zwei Verbandsebenen in der Mitte des Hauptträgers eine beidseitig angeordnete Quersteife befindet. Dies soll als Erklärung dafür gelten, dass es in diesem Bereich zu keinem Beulversagen kommt. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass aufgrund der Aufdickung im Stegbereich und der sich an dieser Stelle befindlichen Zuglasche die Beulfigur verlagern kann. Diese Verlagerung ist deutlich anhand der Abbildung 86 zu erkennen.

Einflussparameter

Zu Beginn der Untersuchung soll zunächst aufgezeigt werden, welche Parameter außer der Stegblechdicke weiteren Einfluss auf den Beulsicherheitsnachweis ausüben und daher bei Untersuchung der Beulsicherheit zusätzlich berücksichtigt werden muss.

• Einfluss der Laststellung

Laststellung x [m]	η_{Ki}	Differenz $\eta_{Ki(x=7,5m)}/\eta_{Ki(x)}$
0	2,44	24,1 %
2,5	2,81	34,1 %
5	3,42	45,9 %
7,5	1,85	-
6,5	2,01	7,9 %

Tabelle 31: Einfluss der Laststellung auf das Beulverhalten nach FE-Methode

Dem Einfluss der Laststellung soll ein besonders Augenmerk zukommen. Aus Tabelle 31 ist zu erkennen, dass für die Laststellung $x=0m$ sowie $x=7,5m$ die Verzweigungslastfaktoren annähernd gleich ausfallen und vergleichend zu den anderen Laststellungen maßgebend sind. Jedoch muss dabei berücksichtigt werden, welche Wirkungen die einzelnen Laststellungen ausüben. An der Stelle $x=0m$ entsteht die Beulgefährdung infolge Normalspannung σ_x und Schubspannung τ (kombiniertes Druck- und Schubbeulen), an der Stelle $x=6,5m$ und $x=7,5m$ entsteht die Beulgefährdung infolge konzentrierter Lasteinleitung und damit unter der Spannung σ_z (Druckbeulen). Anhand der Beulfiguren (Abbildung 87) soll der Einfluss der Laststellung verdeutlicht werden.

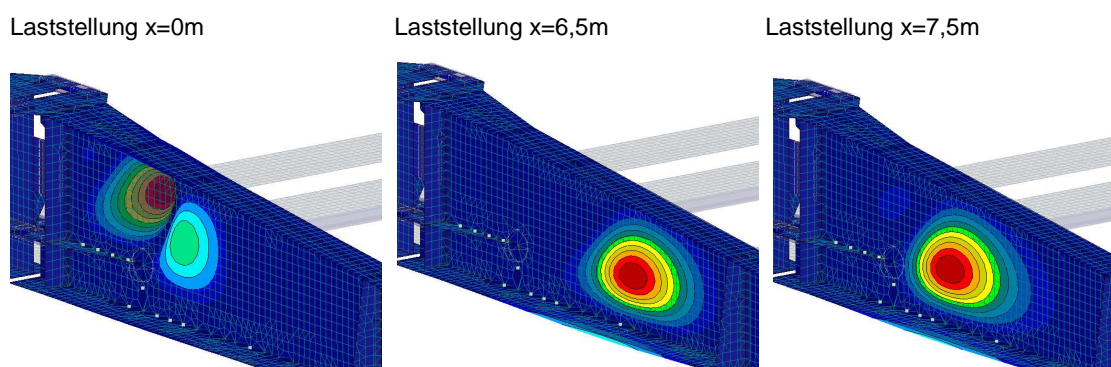


Abbildung 87: Vergleich der Beulfiguren in Abhängigkeit der Laststellung

Die Beulfiguren unterscheiden sich deutlich voneinander. In der linken Abbildung entstehen zwei durch eine Zugdiagonale geteilte Beulen, im rechten Bild hingegen eine größeres Beulbild infolge der konzentrierten Lasteinleitung. Diese Erkenntnis hat insbesondere gro-

ßen Einfluss auf die konstruktiven Gegenmaßnahmen. Gegen die Beulgefährdung unter konzentrierter Lasteinleitung ist die Verwendung einer Quersteife sinnvoll. Für die Laststellung $x=0\text{m}$ ist eine Quersteife nur im Zentrum der Beule sinnvoll. Befindet sich die Quersteife jedoch im Bereich der Zugdiagonale, übt dies praktisch keinen Einfluss auf die entstehende Beulfigur aus. Daher ist es zweckmäßig, eine Längssteife im oberen Drittel des Stegblechs (auf der Druckseite) anzubringen.

Für die folgenden Untersuchungen werden Laststellungen $x=0\text{m}$, $x=6,5\text{m}$ und $x=7,5\text{m}$ berücksichtigt. Alle anderen Einwirkungsstellen sind nicht bemessungsrelevant.

• Einfluss der Dicke des Obergurtes

Dicke OG [mm]	η_{Ki} $x=0\text{m}$	Differenz $x=0\text{m}$ $\eta_{Ki(t=25\text{mm})}/\eta_{Ki(t)}$	η_{Ki} $x=7,5\text{m}$	Differenz $x=7,5\text{m}$ $\eta_{Ki(t=25\text{mm})}/\eta_{Ki(t)}$
35	3,21	24,0 %	1,91	3,1 %
30	2,87	15,0 %	1,89	2,1 %
25	2,44	-	1,85	-
20	1,62	33,6 %	1,80	2,7 %

Tabelle 32: Einfluss der Obergurtdicke auf das Beulverhalten

Die Dicke des Obergurtes übt einen deutlichen Einfluss auf den Beulsicherheitsnachweis aus. Dies ist damit zu erklären, dass bei sehr dünnem Obergurt dieser ebenfalls instabil wird und somit die Beulgefährdung im Steg verstärkt. Die Größe des beulgefährdeten Bereiches nimmt dabei ebenfalls zu. Die untere Abbildung 88 verdeutlicht diesen Effekt. Zu erkennen ist, dass sich infolge der Spannung eine Zug- und Druckdiagonale ausbildet. Die Zugdiagonale sorgt so für eine Art natürliche Lagerung, was die Größe des Beulfeldes begrenzt. Bei gleichzeitigem lokalem Ausweichen des Obergurtes ist die Zugwirkung kaum spürbar, die Beulfeldgröße nimmt deutlich zu, dies ist auch anhand der in der Tabelle 32 aufgelisteten Werte ersichtlich.

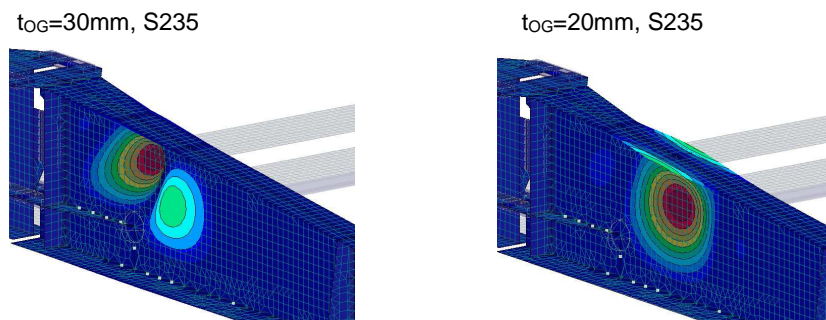


Abbildung 88: Einfluss der Obergurtdicke auf das Beulverhalten

• Einfluss der Dicke des Untergurts

Dicke UG [mm]	η_{Ki} $x=0m$	Differenz $x=0m$ $\eta_{Ki(t=20mm)}/\eta_{Ki(t)}$	η_{Ki} $x=7,5m$	Differenz $x=7,5m$ $\eta_{Ki(t=20mm)}/\eta_{Ki(t)}$
30	2,18	10,6 %	2,32	20,2%
25	2,29	6,1 %	2,13	13,1%
20	2,44	-	1,85	-
15	2,64	7,5 %	1,47	21,0 %

Tabelle 33: Einfluss der Untergurtdicke auf das Beulverhalten nach FE-Methode

Der Einfluss der Dicke des Untergurtes nach Tabelle 33 ist zwar etwas geringer, jedoch keinesfalls zu vernachlässigen. Auch hier kann es bei dünnen Untergurtdicken zu einer leichten Verdrehung und somit zu einer Verstärkung der Beulgefährdung im Steg kommen. Jedoch fällt die Verdrehung aufgrund der Zugkraft im Untergurt im Verhältnis zum Druckgurt geringer aus. Dennoch ist die Dicke des Untergurtes ebenfalls als Untersuchungsparameter zu berücksichtigen.

Auswirkungen konstruktiver Maßnahmen

Aufgezeigt werden soll, welchen Einfluss die Anordnung von Quersteifen und Längssteifen unter Beachtung definierter Laststellungen auf die Beulgefährdung nimmt. Der folgenden Abbildung 89 ist die Bezeichnung der Beulfelder zu entnehmen.

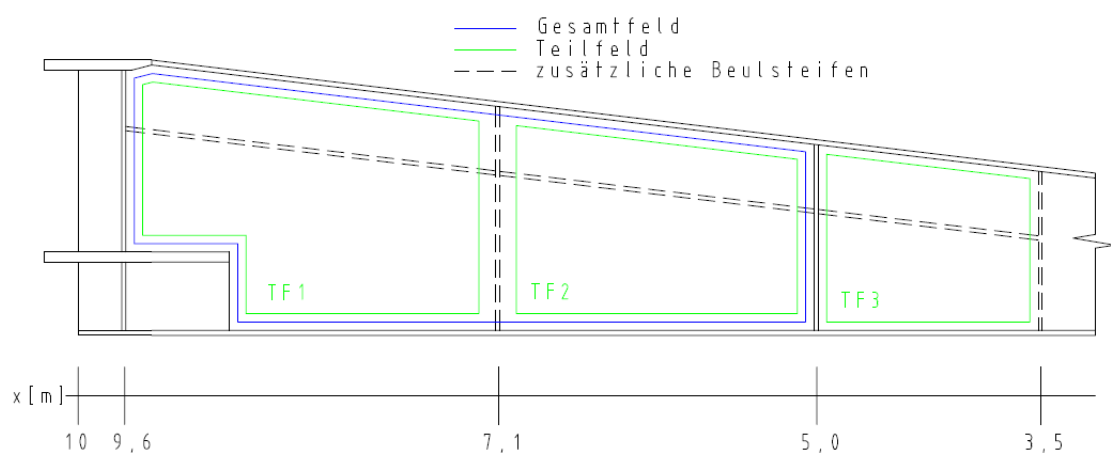


Abbildung 89: Bezeichnung der Beulfelder

• Auswirkung einer zusätzliche Quersteife

Zunächst wird untersucht, welcher Einfluss durch eine zusätzliche Quersteife an der Stelle $x=7,1\text{m}$ zu erwarten ist. Die Stelle $x=7,1\text{m}$ wurde anhand von Versuchen ermittelt. Zielsetzung war dabei, die Quersteife so zu positionieren, dass die Verzweigungslastfaktoren für die Laststellung $x=6,5\text{m}$ und $x=7,5\text{m}$ annähernd gleich ausfallen, um keine weitere Queraussteifung vornehmen zu müssen und somit den Fertigungsaufwand möglichst gering zu halten. Anhand der Abbildung 90 und der dazugehörigen Tabelle 34 mit den Ergebnissen der Verzweigungslastfaktoren wird der Einfluss in den drei untersuchten Laststellungen aufgezeigt.

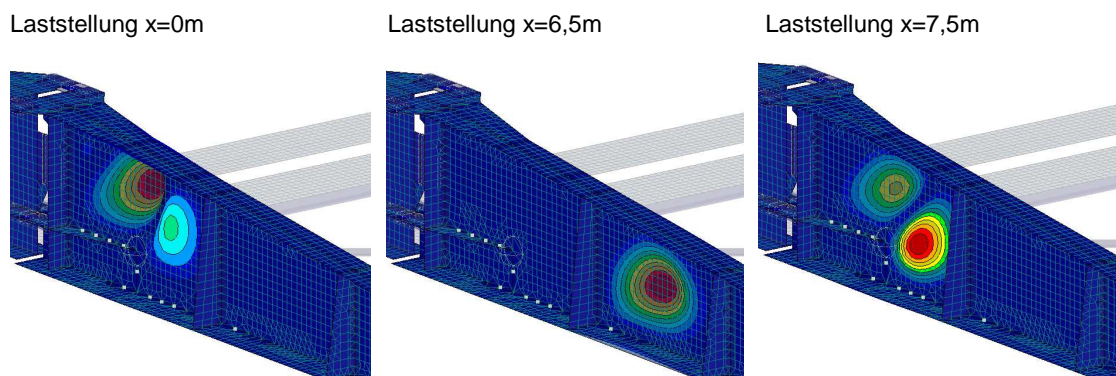


Abbildung 90: Beulfiguren mit zusätzlicher Quersteife bei $x=7,1\text{m}$

Das Ergebnis und auch die Abbildungen zeigen deutlich, dass die Gefährdung in der Laststellung $x=0\text{m}$ mit 2% nicht merklich verbessert wurde. Im Gegensatz dazu ist die Beulgefährdung an den Einwirkungsstellen $x=6,5\text{m}$ mit 42,2% und an der Stelle $x=7,5\text{m}$ mit 52% deutlich herabgesetzt worden.

Laststellung x [m]	η_{KI} mit zusätzlicher Quersteife	Vergleich η_{KI} ohne zusätzliche Quersteife	Differenz ¹⁾
0	2,49	2,44	2,0 %
6,5	3,48	2,01	42,2 %
7,5	3,90	1,85	52,5 %
¹⁾ = η_{KI} ohne zusätzliche Quersteife / η_{KI} mit zusätzlicher Quersteife			

Tabelle 34: Beulverhalten mit zusätzlicher Quersteife bei $x=7,1\text{m}$ nach FE-Methode

• Einfluss einer Quersteife und einer Längssteife im Teilfeld 1

Die zusätzliche Längssteife wird konstruktiv im oberen Drittel des Stegblechs, parallel verlaufend zum Obergurt mit einem Abstand von 400mm positioniert. Verwendet wird ein Blech 20x100mm. Die Länge ist begrenzt durch die zusätzliche Quersteife an der Stelle

$x=7,1\text{m}$. Dies bedeutet auch im Folgenden, dass bei der Anordnung einer Längssteife stets eine Quersteife vorzusehen ist. Daher wird auch in der nachfolgenden Tabelle 35 der Vergleich zur quer ausgesteiften Variante gezogen. Die entstehenden Beulfiguren für die drei maßgebenden Laststellungen können der Abbildung 91 entnommen werden.

Laststellung x [m]	Steifenan- ordnung	η_{Ki} mit zusätzlicher Quersteife + Längs- steife TF1	Vgl. η_{Ki} zur Variante mit zusätzliche Quer- steife $x=7,1\text{m}$	Differenz ¹⁾
0	einseitig	3,80	2,49	34,4%
6,5	einseitig	3,48	3,48	0%
7,5	einseitig	5,10	3,90	23,5%
0	beidseitig	3,74	2,49	33,4%
6,5	beidseitig	3,48	3,48	0%
7,5	beidseitig	5,25	3,90	25,7%

¹⁾ = η_{Ki} mit zusätzliche Quersteife / η_{Ki} mit zusätzlicher Quersteife + Längssteife TF1

Tabelle 35: Beulverhalten mit Quer- und Längssteife nach FE-Methode

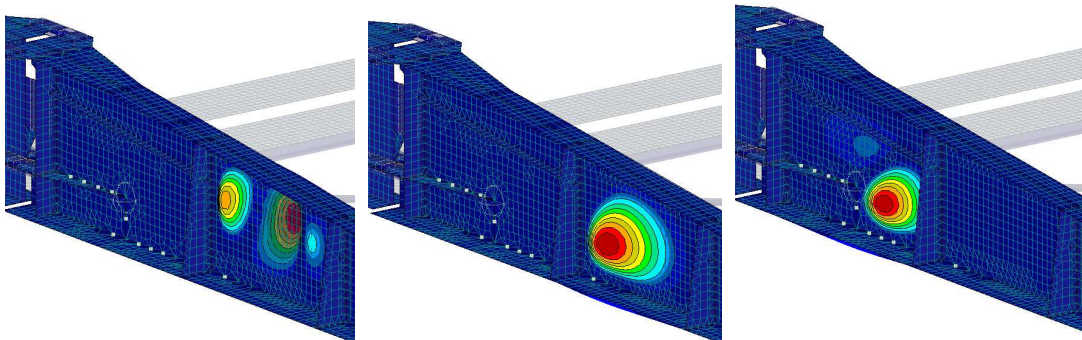


Abbildung 91: Beulfiguren mit Quersteife und Längssteife im TF1

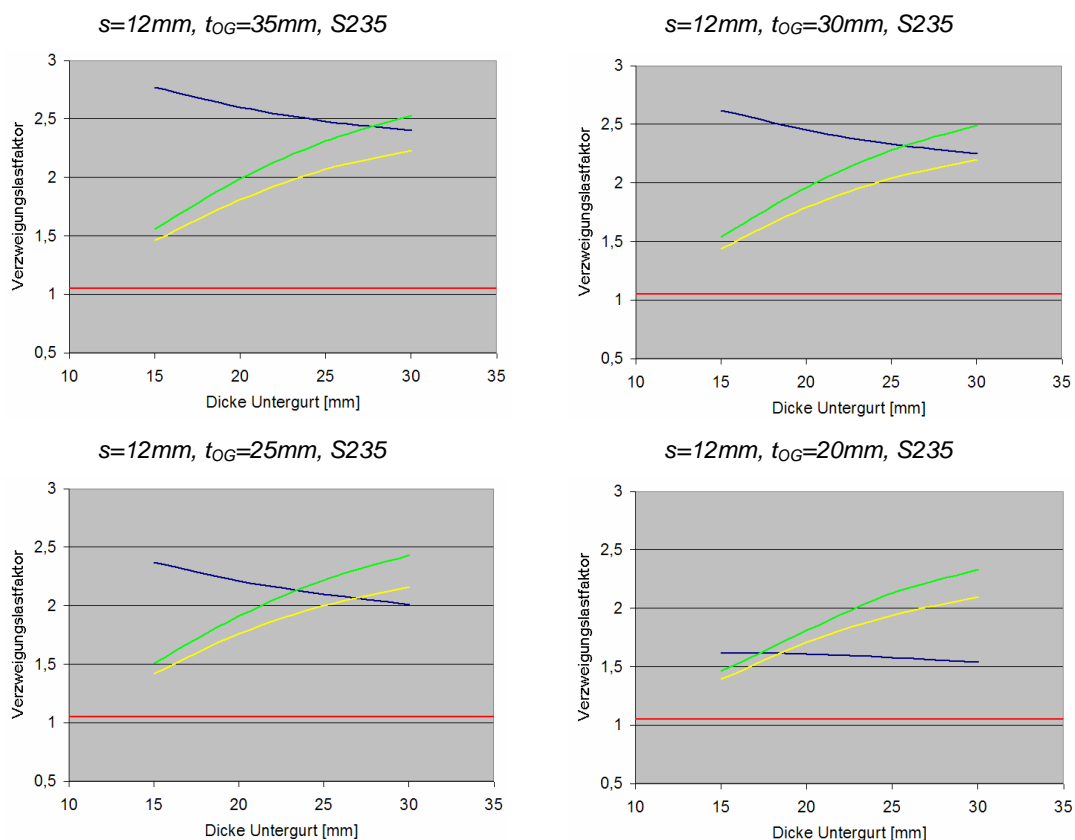
Es zeigt sich deutlich, dass die Längssteife die Beulgefährdung in der Laststellung $x=0\text{m}$ deutlich herabsetzt. Der Beulwert infolge der Einwirkung an der Stelle $x=7,5\text{m}$ verändern sich ebenfalls geringfügig positiv, bei $x=6,5\text{m}$ ist keine Unterschied feststellbar. Zum anderen zeigt sich, dass eine beidseitige angeordnete Längssteife keinen positiven Einfluss auf das System nimmt. Ist die Beulsicherheit trotz zusätzlicher Quer- und Längssteife im TF1 nicht erfüllt, muss eine zweite Längssteife im TF2 vorgesehen werden.

Bestimmung der Beulwerte

Unter diesem Punkt soll aufgezeigt werden, unter welchen Bedingungen es im Konkreten zum Stabilitätsversagen infolge Beulen ohne die Verwendung zusätzlicher Aussteifungsmaßnahmen im Gesamtfeld kommt. Anhand dieser Erkenntnisse können für die beulgefährdeten Varianten die aufgezeigten konstruktiven Gegenmaßnahmen eingeleitet und die Teilfelder nachgewiesen werden. Alle ermittelten Werte können im Einzelnen dem Anhang C 2 entnommen werden. Die folgende Legende soll übergeordnet für Diagramm 9 bis Diagramm 26 gelten:

Legende: *Laststellung*

- $x = 0\text{m}$
- $x = 6,5\text{m}$
- $x = 7,5\text{m}$
- $\eta_{Ki,Grenz}$

• Beulverhalten für S235, unversteift**Diagramm 9: Beulverhalten für $s=12\text{mm}$ in S235, unversteift**

Anhand von Diagramm 9 mit den darin ersichtlichen Ergebnisverläufen der jeweiligen Laststellungen in Abhängigkeit der Abmessungsverhältnisse lassen sich vorab folgende Aussagen ableiten und begründen.

Zum einen verhält sich das Beulverhalten für die Laststellung $x=0\text{m}$ gegenläufig zu den Laststellungen $x=6,5\text{m}$ und $x=7,5\text{m}$. Wie bereits zu Beginn des Kapitels beschrieben, ist die Instabilität im Stegblech abhängig von der Art der Einwirkung und damit von der Art der wirkenden Spannungen.

Die Laststellung $x=0\text{m}$ führt zur Instabilität infolge Normalspannung in x-Achse und Schubspannung. Die Ergebnisverläufe zeigen, dass die Stabilitätsgefährdung mit steigender Untergurtdicke und fallender Obergurtdicke zunimmt. Dies ist mit dem sich verändernden Randspannungsverhältnis zu begründen, da infolge des sich verlagernden Gesamtschwerpunkts in Richtung des Untergurts die Höhe der Druckzone zunimmt.

Für die Laststellungen $x=6,5\text{m}$ und $x=7,5\text{m}$ entsteht Instabilität im Stegblech infolge konzentrierter Lasteinleitung und damit unter Normalspannung in z-Richtung. In Diagramm 9 ist zu erkennen, dass die Verzweigungslastfaktoren von den Obergurtdicken fast unbeeinflusst bleiben und demzufolge nur durch die Untergurtdicke beeinflusst wird. Dies erscheint logisch, da die Größe der Spannung σ_z von den Faktoren Untergurtdicke, Stegdicke, Schweißnahtdicke und Lasteinleitungslänge beeinflusst wird. Da die drei letztgenannten Faktoren für Diagramm 9 als konstant gelten, steigt die Größe der Spannung mit fallender Untergurtdicke.

Weiterhin ist zu erkennen, dass mit dünner werdenden Gurtstärken zunehmend die Laststellung $x=0\text{m}$ maßgebend wird. Dies ist damit zu begründen, dass durch die sinkende Steifigkeit des Gesamtquerschnitts die spannungsmäßige Auslastung für σ_x und τ steigt, was zu einer verstärkten Beulgefährdung führt.

Unabhängig von den gerade beschriebenen Auswirkungen bei verschiedenen geometrischen Abmessungsverhältnissen ist in Diagramm 9 ersichtlich, dass keiner der Werte die Grenze von $\eta_{KI}=1,05$ unterschreitet. Somit ist mit keiner Stabilitätsgefährdung bei einer Stegdicke von 12mm in S235 auszugehen.

Diagramm 10 bis Diagramm 26 zeigen die Ergebnisse für die restlichen Varianten sowie für unterschiedliche konstruktive Maßnahmen. Daran kann abgeleitet werden, ob der Stabilitätsfall Beulen maßgebend ist, beziehungsweise unter welchen konstruktiven Maßnahmen die Beulsicherheit gewährleistet wird.

6. Variantenuntersuchung Vorbauschnabel

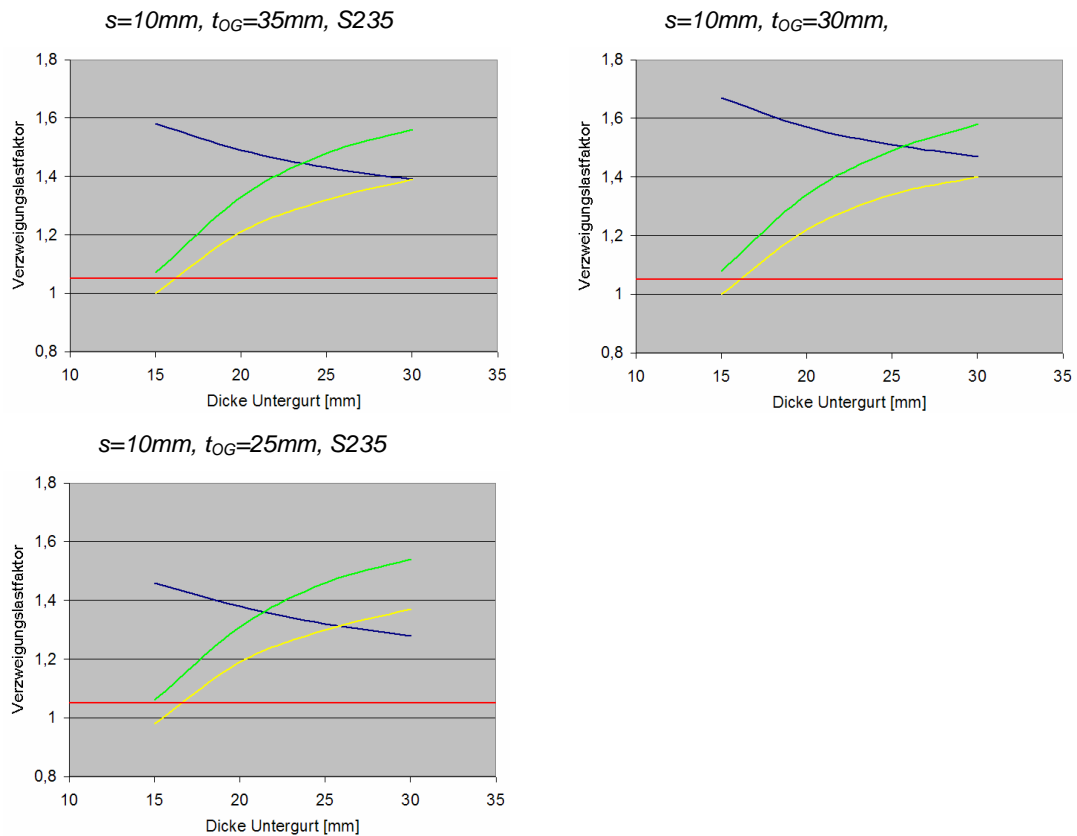


Diagramm 10: Beulverhalten für $s=10\text{mm}$ in S235, unversteift

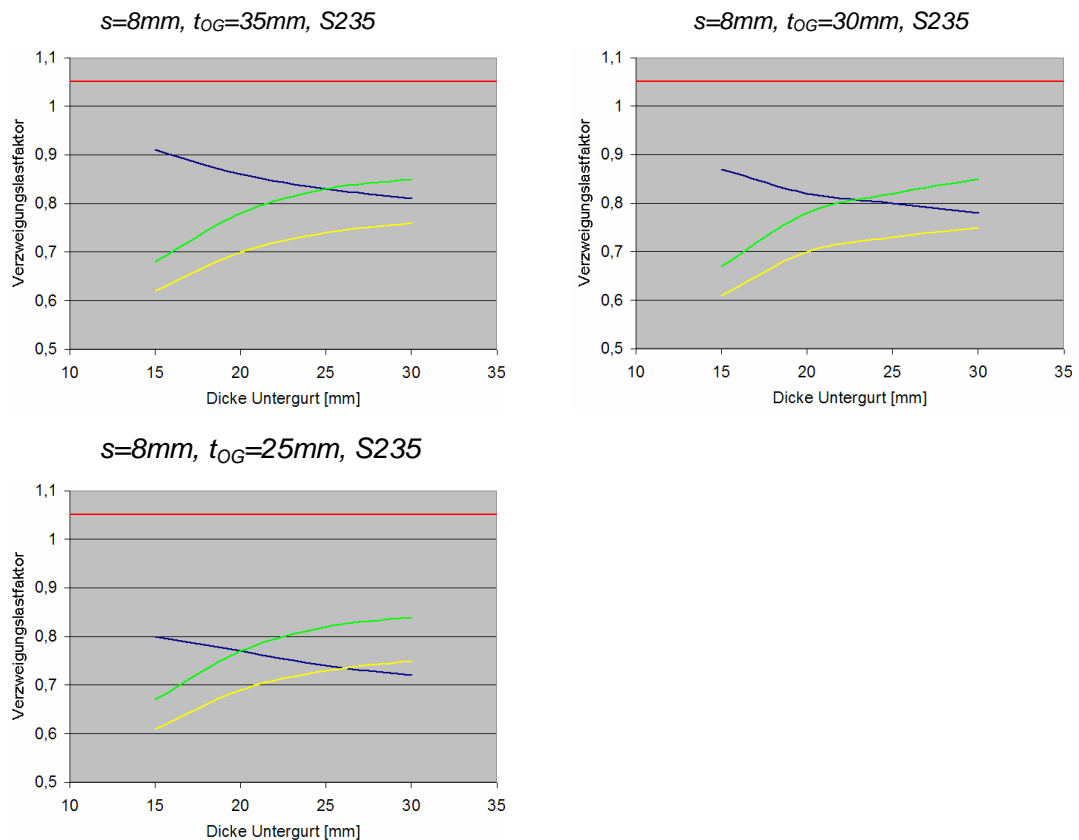


Diagramm 11: Beulverhalten für $s=8\text{mm}$ in S235, unversteift

• Beulverhalten für S235, mit zusätzlichen Quersteife bei $x=7,1m$

Das Beulverhalten unter Beachtung zusätzlicher Austeifungsmaßnahmen wird nur für die Varianten grafisch dargestellt, bei denen im unversteiften Zustand Stabilität maßgebend ist. Die Werte dafür, sowie für die nicht gezeigten Abmessungsverhältnisse können dem Anhang C 2 entnommen werden.

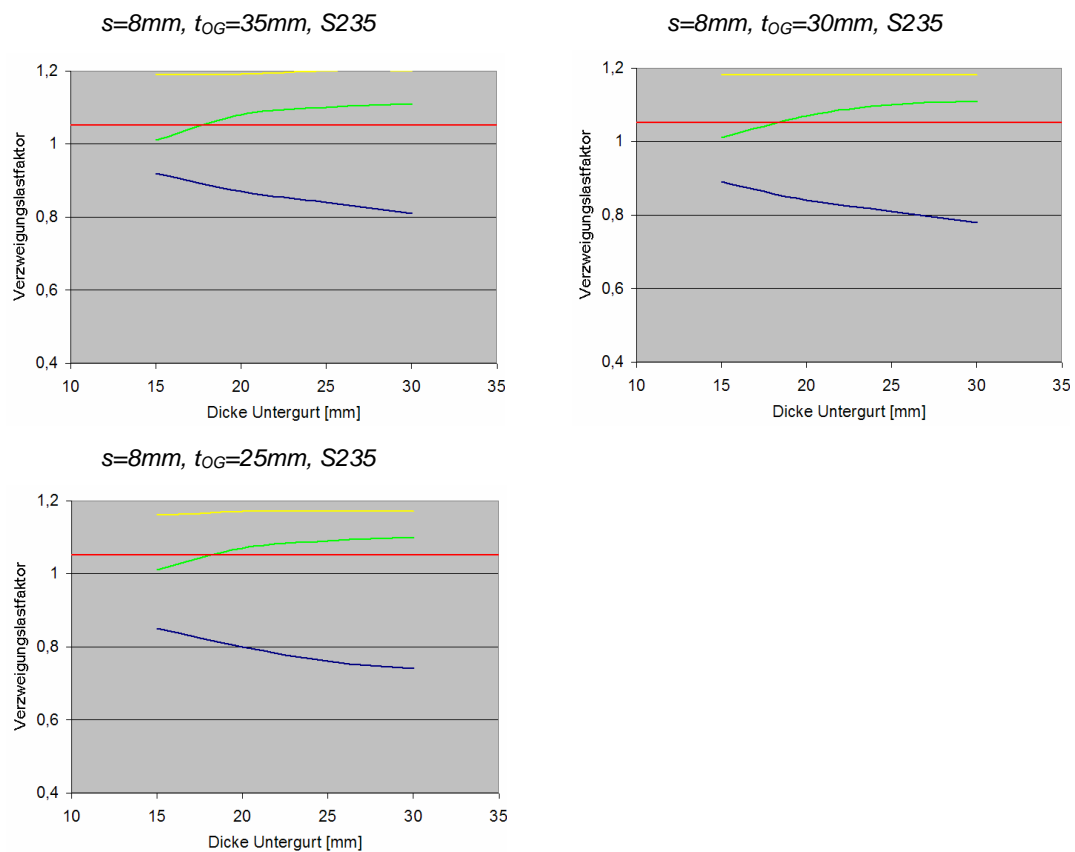


Diagramm 12: Beulverhalten für $s=8mm$ in S235, mit Quersteife

6. Variantenuntersuchung Vorbauschnabel

• Beulverhalten für S235, mit Quersteife bei $x=7,1\text{m}$ und Längssteife TF1

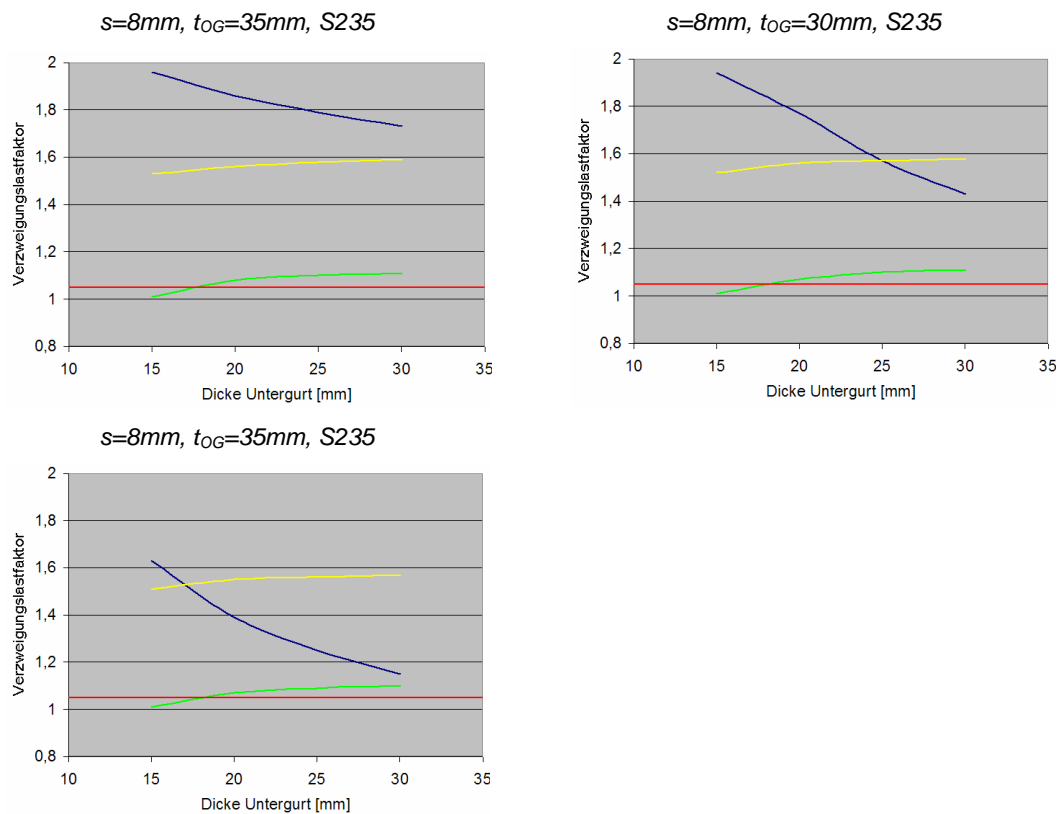


Diagramm 13: Beulverhalten für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife TF1

• Beulverhalten für S235, mit Quersteife bei $x=7,1\text{m}$ und Längssteife in TF1 / TF2

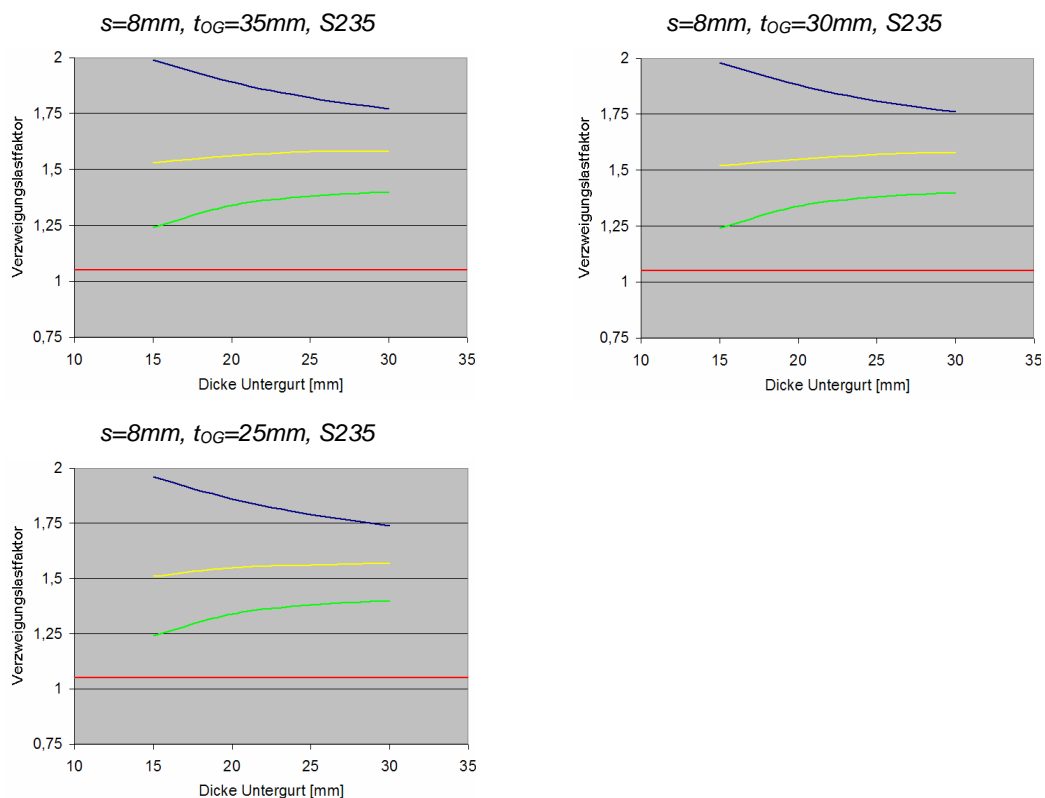


Diagramm 14: Beulverhalten für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife TF1/TF2

• Beulverhalten für S355, unversteift

Für die Stabilitätsgefährdung in S355 entfällt die Untergurtdicke von 30mm aufgrund der spannungsmäßig zu geringen Auslastung, demzufolge werden nur 15mm, 20mm und 25mm untersucht.

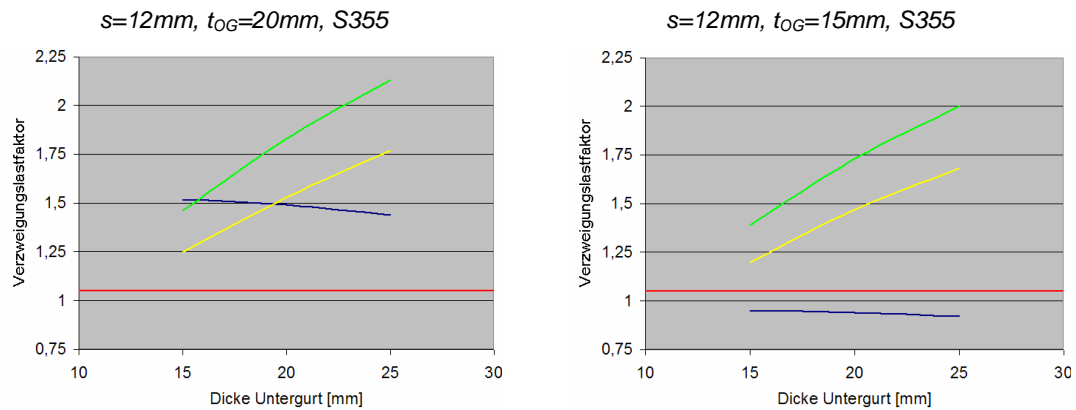


Diagramm 15: Beulverhalten für $s=12mm$ in S355, unversteift

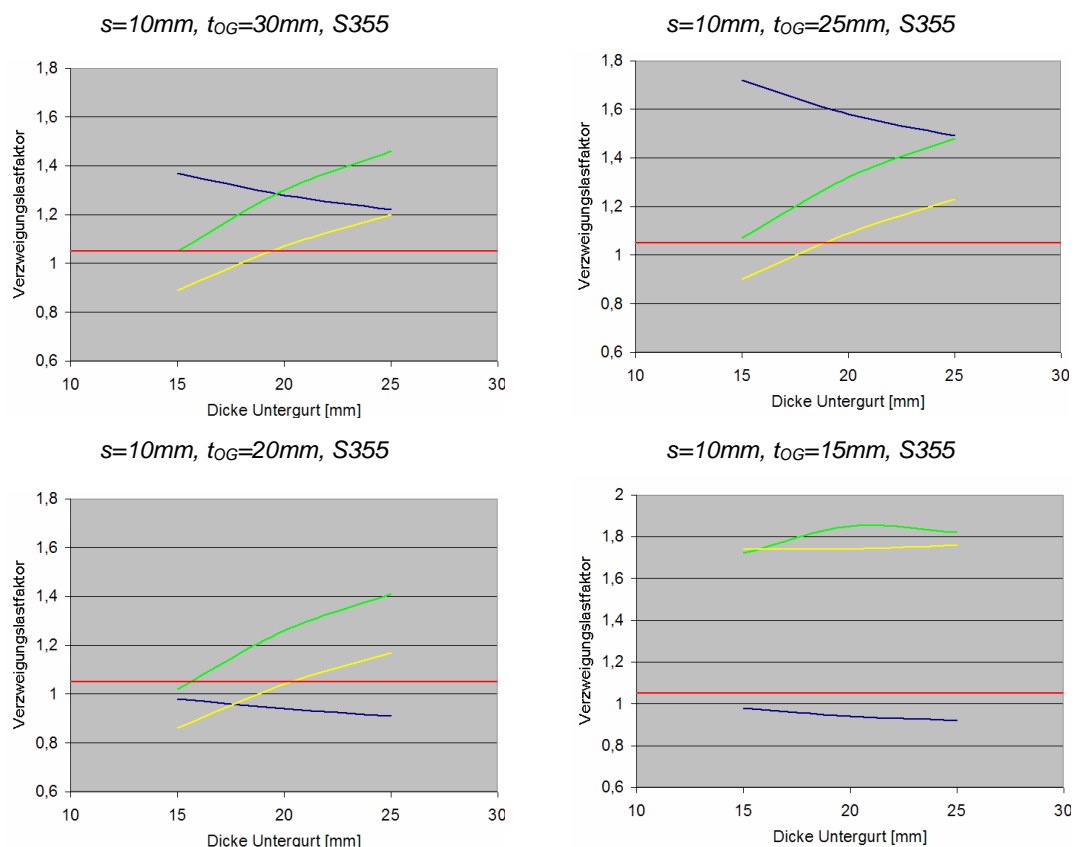


Diagramm 16: Beulverhalten für $s=10mm$ in S355, unversteift

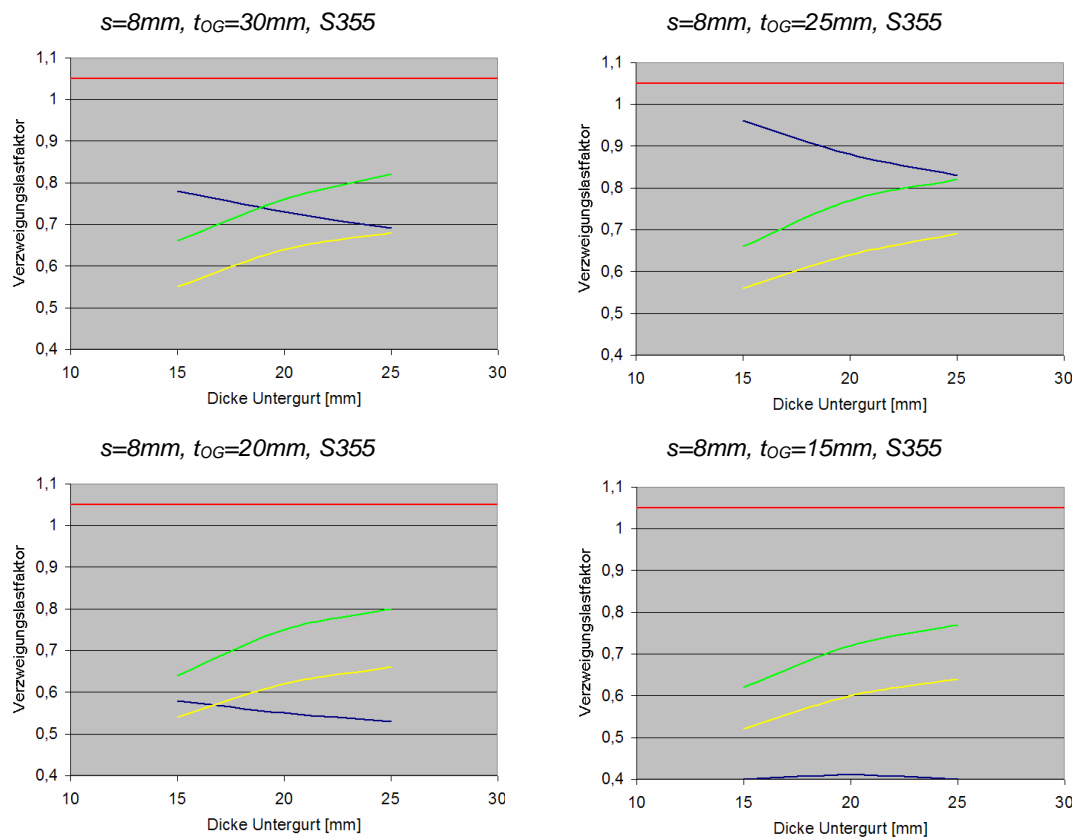


Diagramm 17: Beulverhalten für $s=8\text{mm}$ in S355, unversteift

• Beulverhalten für S355, mit zusätzlichen Quersteife bei $x=7,1\text{m}$

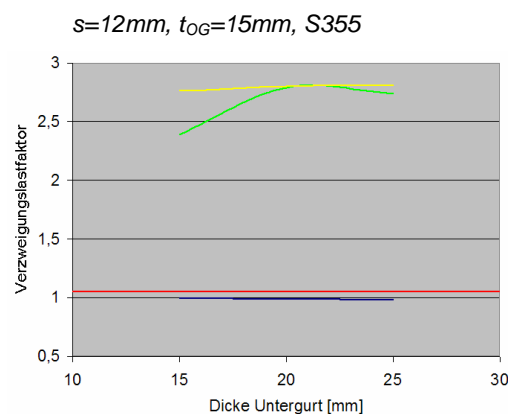


Diagramm 18: Beulverhalten für $s=12\text{mm}$ in S235, mit Quersteife

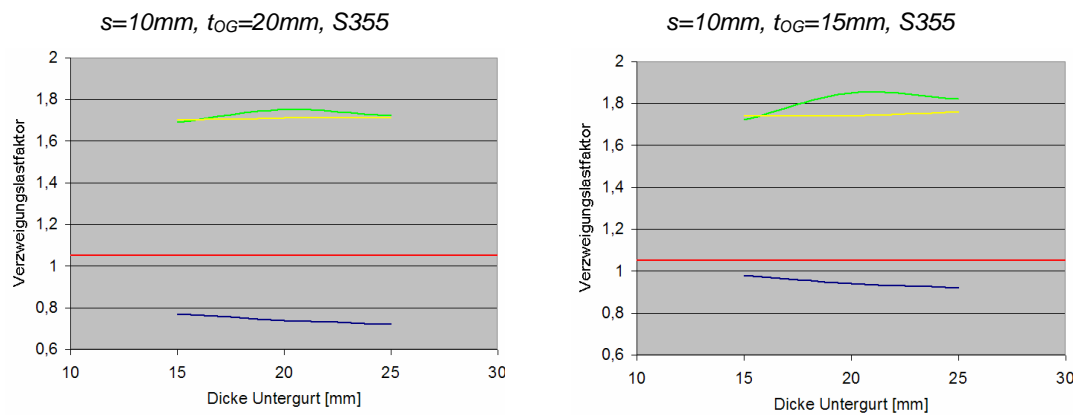


Diagramm 19: Beulverhalten für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quersteife

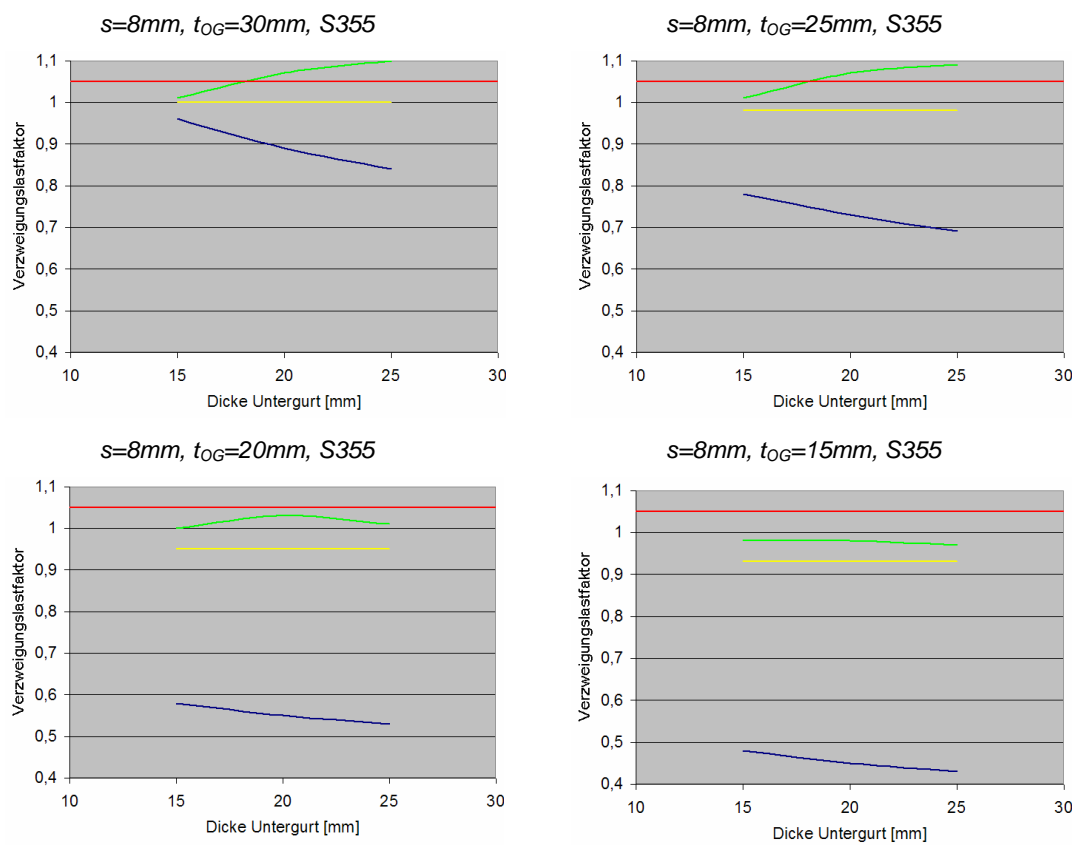


Diagramm 20: Beulverhalten für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quersteife

• Beulverhalten S355, mit Quersteife bei $x=7,1m$ und Längssteife in TF1

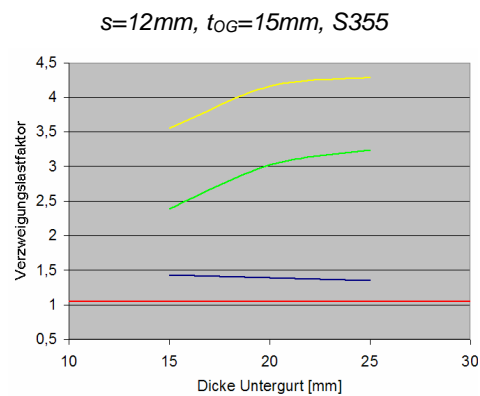


Diagramm 21: Beulverhalten für $s=12mm$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1

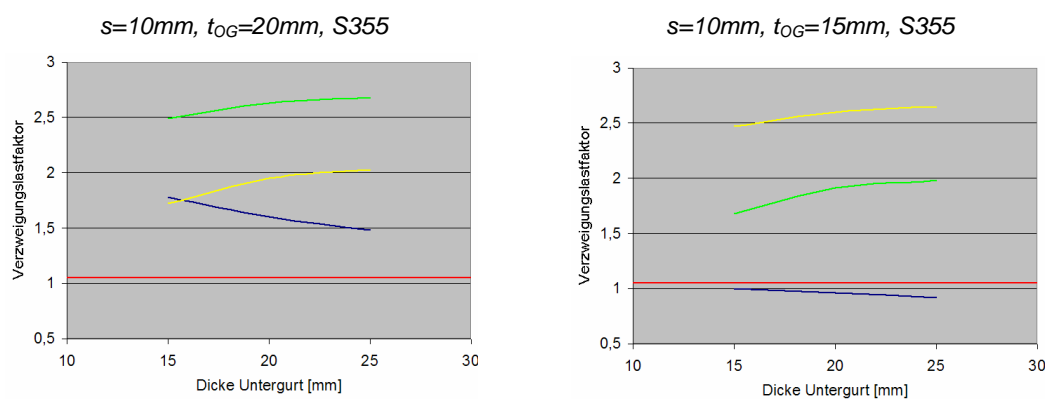


Diagramm 22: Beulverhalten für $s=10mm$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1

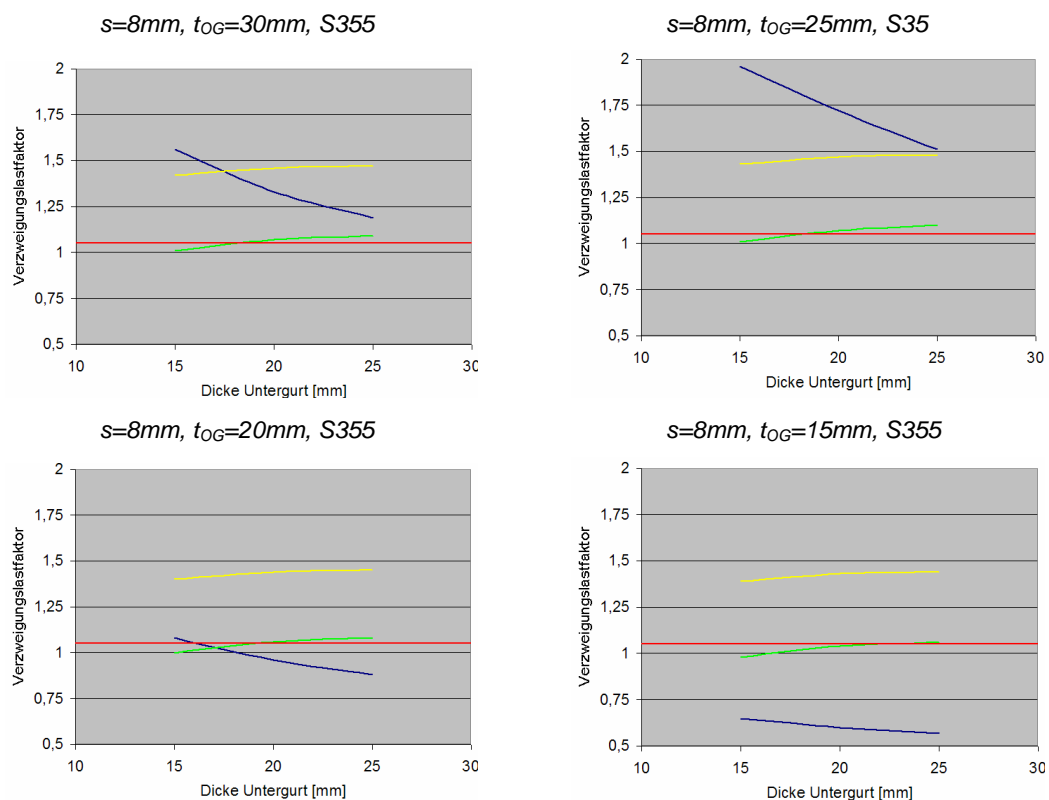


Diagramm 23: Beulverhalten $s=8mm$ in S355, mit Quer- und Längssteife

6. Variantenuntersuchung Vorbauschabel

• Beulverhalten im Steg mit zusätzlichen Quersteife bei $x=7,1m$ und 2 Längssteife

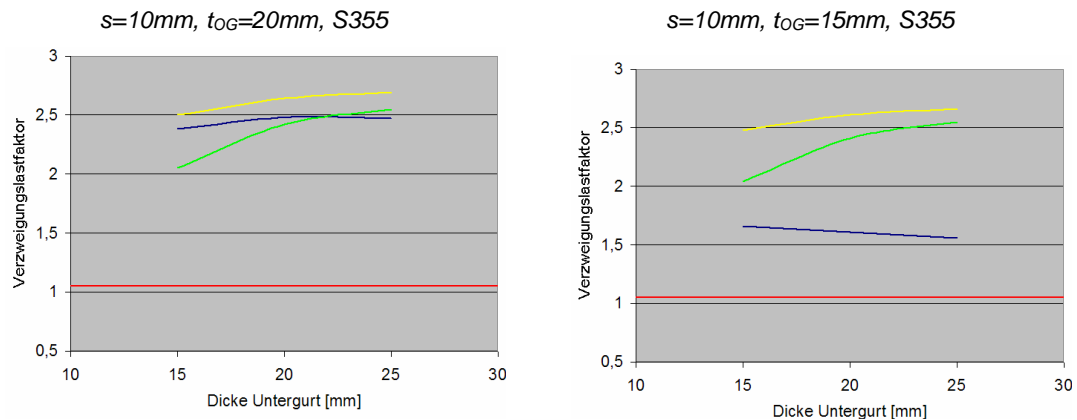


Diagramm 24: Beulverhalten für $s=10mm$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1/TF2

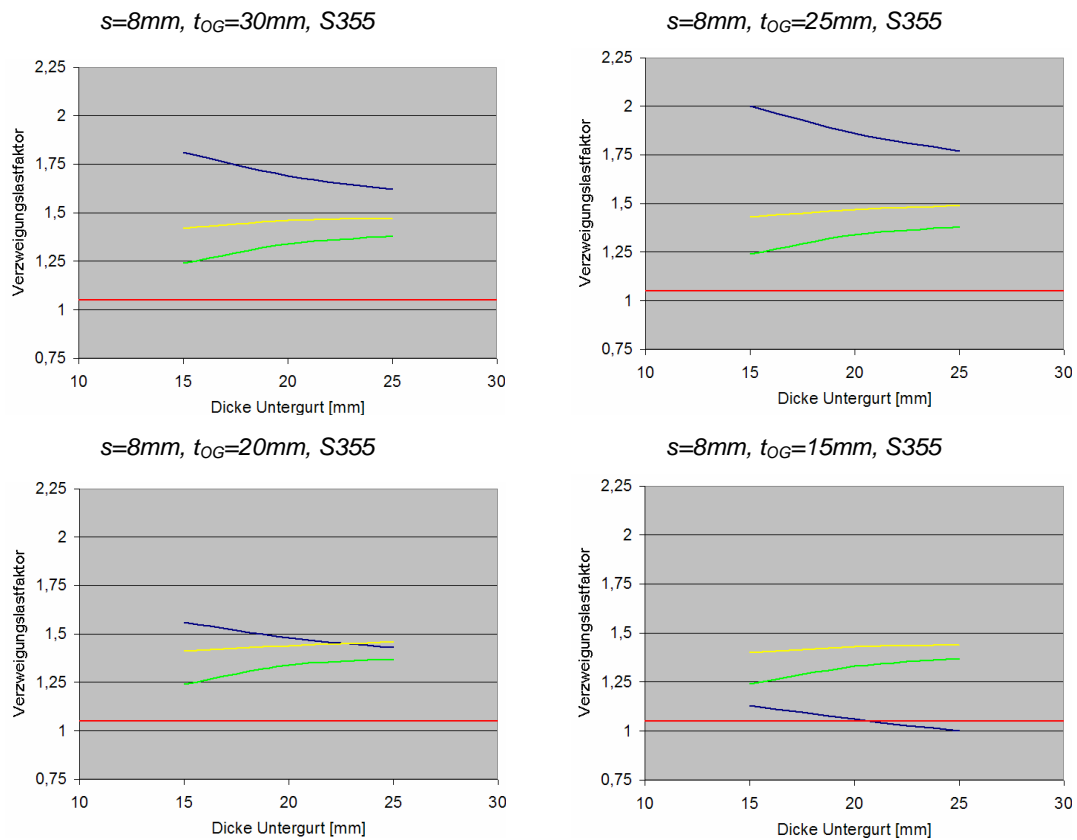


Diagramm 25: Beulverhalten für $s=8mm$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1/TF2

- Beulverhalten im Steg mit zusätzlichen Quersteife bei $x=7,1\text{m}$ und 3 Längssteife

Bei dieser Ausführung ist zusätzlich zu den beschriebenen Aussteifungsmaßnahmen in Teilfeld 1 und Teilfeld 2 eine weitere Quersteife bei $x=3,5\text{m}$ sowie eine Längssteife in dem dadurch entstehenden Teilfeld zwischen $x=3,5\text{m}$ und $5,0\text{m}$ erforderlich.

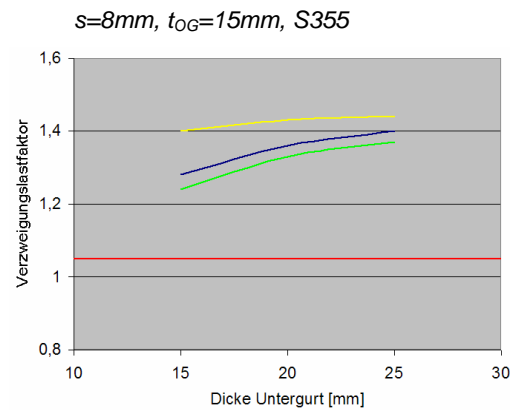


Diagramm 26: Beulverhalten $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1/TF2/TF3

• Zusammenfassung der FEM-Ergebnisse

Als Zusammenfassung werden für die verschiedenen Materialdickenkombinationen die jeweils erforderlichen Aussteifungsmaßnahmen aufgelistet. In der Tabelle 36 und Tabelle 37 nicht aufgelistete Varianten können stets unversteift ausgeführt werden.

Materialdicke [mm]			Aussteifungsmaßnahmen ¹⁾
Steg	Untergurt	Obergurt	
10 mm	30 mm	35 mm	Keine
		30 mm	Keine
		25 mm	Keine
	25 mm	35 mm	Keine
		30 mm	Keine
		25 mm	Keine
	20 mm	35 mm	Keine
		30 mm	Keine
		25 mm	Keine
	15 mm	35 mm	Quersteife bei x=7,1m
		30 mm	Quersteife bei x=7,1m
		25 mm	Quersteife bei x=7,1m
8 mm	30 mm	35 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife LF1
		30 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife LF1
		25 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife LF1
	25 mm	35 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife LF1
		30 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife LF1
		25 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife LF1
	20 mm	35 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife LF1
		30 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife LF1
		25 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife LF1
	15 mm	35 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1/TF2
		30 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1/TF2
		25 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1/TF2
¹⁾ nicht aufgelistete Varianten sind unversteift auszuführen			

Tabelle 36: Zusammenfassung der zusätzlichen Aussteifungsmaßnahmen zur Sicherstellung der Beulsicherheit für S235 nach FE-Methode

Materialdicke			Aussteifungsmaßnahmen ¹⁾
Steg	Untergurt	Obergurt	
12 mm	25 mm	30 mm	Keine
		25 mm	Keine
		20 mm	Keine
		15 mm	Keine
	20 mm	30 mm	Keine
		25 mm	Keine
		20 mm	Keine
		15 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1
	15 mm	30 mm	Keine
		25 mm	Keine
		20 mm	Keine
		15 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1
10 mm	25 mm	30 mm	Keine
		25 mm	Keine
		20 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1
		15 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1/TF2
	20 mm	30 mm	Keine
		25 mm	Keine
		20 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1
		15 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1/TF2
	15 mm	30 mm	Quersteife bei x=7,1m
		25 mm	Quersteife bei x=7,1m
		20 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1
		15 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1/TF2
8 mm	25 mm	30 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1
		25 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1
		20 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1
		15 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1/TF2/TF3
	20 mm	30 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1
		25 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1
		20 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1/TF2
		15 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1/TF2
	15 mm	30 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1/TF2
		25 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1/TF2
		20 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1/TF2
		15 mm	Quersteife bei x=7,1m + Längssteife TF1/TF2

¹⁾ nicht aufgelistete Varianten sind unversteift auszuführen

Tabelle 37: Zusammenfassung der zusätzlichen Aussteifungsmaßnahmen zur Sicherstellung der Beulsicherheit für S355 nach FE-Methode

Analytische Berechnung

Die Nachweisführung per Hand erfolgt nach DIN 18800-3. Um bei der Wirkung aus konzentrierter Lasteinleitung insbesondere die Lasteinleitungslänge zu berücksichtigen, wird zusätzlich [13] Seite 8.105 bis Seite 8.106 sowie [14] Seite 893 herangezogen. Der Ablauf der Nachweisführung kann dem Struktogramm im Kapitel 4.5.1 entnommen werden. Die einzelnen Berechnungsschritte sind im Anhang B 7 detailliert aufgelistet.

Zunächst sollen zwei Bedingungen überprüft werden, um festzustellen, unter welchen Verhältnissen überhaupt ein genauerer Beulsicherheitsnachweis des Stegblechs nach DIN 18800-3 erbracht werden muss. Die erste Bedingung ist der DIN 18800-3 (204) durch Einhaltung der b/t -Verhältnisse zu entnehmen. Die entsprechenden Berechnungsgrundlagen sind der DIN 18800-1, Tabelle 12 für das Berechnungsverfahren elastisch-elastisch zu entnehmen. Ist der Nachweis erfüllt, gelten alle Querschnittsteile unter Druckbeanspruchung als voll mittragend. Als zweite Bedingung muss die in DIN 18800-1 (744) angegebene Stegslankheit von $h/s \leq 60$ erfüllt sein, um auf einen zusätzlichen Beulsicherheitsnachweis infolge konzentrierter Lasteinleitung verzichten zu können.

• Bedingung 1 – Einhaltung der b/t - Verhältnisse

Die Einhaltung der b/t – Verhältnisse ist nicht nur von den Steghöhe / Stegdicke abhängig, sondern auch vom Spannungsverhältnis. Maßgebend ist der Querschnitt an der Stelle am Ende der Zuglasche, da dieser dort die größte Steghöhe aufweist. Da die Länge der Zuglasche in Abhängigkeit der Stegdicke variiert, muss auch die Querschnittshöhe für jede Stegdicke individuell ermittelt werden. Um nicht für alle Ober- und Untergurtdickenkombinationen das Spannungsverhältnis zu ermitteln, werden nur die jeweils ungünstigsten Kombinationen betrachtet (Tabelle 38 und Tabelle 39). Die Berechnungen können im Einzelnen dem Anhang B 7 entnommen werden.

Der Berechnung erfolgt mit:

$$\text{grenz}(b/t) = 420,4 \cdot (1 - 0,278 \cdot \psi - 0,025 \cdot \psi^2) \cdot \sqrt{\frac{k_{\sigma}}{\sigma_1 \cdot \gamma_M}} \quad \text{für } 0 < \psi \leq 1,0$$

$$\hat{=} \text{grenz}(b/t) = 420,4 \cdot (1 - 0,278 \cdot \psi - 0,025 \cdot \psi^2) \cdot \sqrt{\frac{8,2}{\psi + 1,05} \cdot \frac{1}{\sigma_1 \cdot \gamma_M}} \quad \text{nach [13] S. 8.11}$$

$$\text{grenz}(b/t) = 420,4 \cdot \sqrt{\frac{k_{\sigma}}{\sigma_1 \cdot \gamma_M}} \quad \text{für } -1,0 < \psi \leq 0$$

$$\hat{=} \text{grenz}(b/t) = 420,4 \cdot \sqrt{(7,81 - 6,29 \cdot \psi + 9,78 \cdot \psi^2) \cdot \frac{1}{\sigma_1 \cdot \gamma_M}} \quad \text{nach [13] S. 8.11}$$

$$\text{Nachweiskriterium:} \quad \text{vorh}(b/t) / \text{grenz}(b/t) \leq 1,0$$

	Nachweis b/t-Verhältnisse im Stegblech									
	s = 22mm		s = 15mm		s = 12mm		s = 10mm		s = 8mm	
t_{UG} [mm]	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15
t_{OG} [mm]	20	35	20	35	20	35	25	35	25	35
ψ	-0,64	-0,87	-0,59	-0,85	-0,56	-0,84	-0,61	-0,83	-0,58	-0,82
b [cm]	149,2	149,2	148,0	148,0	146,8	146,8	144,4	144,4	142,0	142,0
t [cm]	2,2	2,2	1,5	1,5	1,2	1,2	1,0	1,0	0,8	0,8
σ_1 [N/mm ²]	170,6	138,8	197,8	151,2	212,8	156,8	193,5	160,1	202,1	163,3
<i>vorh</i> b/t	67,8	67,8	98,7	98,7	122,3	122,3	144,4	144,4	177,5	177,5
<i>grenz</i> b/t	122	155	110	146	104	143	113	141	108	139
NW	■	■	■	■	◇	■	◇	◇	◇	◇
Legende: ■ erfüllt (Beulsicherheitsnachweis nicht erforderlich) ◇ nicht erfüllt (Beulsicherheitsnachweis erforderlich)										

Tabelle 38: Nachweis der b/t-Verhältnisse im Stegblech für S235

	Nachweis b/t-Verhältnisse im Stegblech							
	s = 15mm		s = 12mm		s = 10mm		s = 8mm	
t_{UG} [mm]	25	15	25	15	25	15	25	15
t_{OG} [mm]	15	30	20	30	20	30	20	30
ψ	-0,67	-0,94	-0,64	-0,93	-0,62	-0,92	-0,59	-0,91
b [cm]	153,3	153,3	152,1	152,1	150,9	150,9	149,7	149,7
t [cm]	1,5	1,5	1,2	1,2	1,0	1,0	0,8	0,8
σ_1 [N/mm ²]	201,7	168,6	216,9	176,5	228,5	181,9	241,6	187,5
<i>vorh</i> b/t	102,2	102,2	126,7	126,7	150,9	150,9	187,2	187,2
<i>grenz</i> b/t	114	146	108	142	104	139	100	136
NW	■	■	◇	■	◇	◇	◇	◇
Legende: ■ erfüllt (Beulsicherheitsnachweis nicht erforderlich) ◇ nicht erfüllt (Beulsicherheitsnachweis erforderlich)								

Tabelle 39: Nachweis der b/t-Verhältnisse im Stegblech für S355

• Bedingung 2 – Einhaltung der maximalen Stegslankheit

Bezeichn.	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert
s [cm]	2,2	1,5	1,2	1,0	0,8
$h_{(x=7,5m)}$ [cm]	135	135	135	135	135
h/s	≈60	90	112,5	135	168,7
NW	■	◇	◇	◇	◇
Legende: ■ erfüllt (Beulsicherheitsnachweis nicht erforderlich) ◇ nicht erfüllt (Beulsicherheitsnachweis erforderlich)					

Tabelle 40: Nachweis der Verhältnisse h/s

Aus Sicht der Verhältnisse h/s ist für alle Stegdicken außer $s=22\text{mm}$ ein zusätzlicher Beulsicherheitsnachweis infolge konzentrierter Lasteinleitung zu erbringen (Tabelle 40).

Für den Nachweis der Beulsicherheit nach DIN 18800-3 werden analog zur FEM-Berechnung drei Laststellungen untersucht ($x=0\text{m}$; $x=6,5\text{m}$; $x=7,5$). Ebenso werden die gleichen Aussteifungsverhältnisse untersucht, das heißt, eine Quersteife bei $x=7,1\text{m}$ sowie Längssteifen aus $\text{Bl.}20\times 100$ im jeweilig betrachteten Teilfeld. Die Ausgangsdaten der Nachweisführung werden im Folgenden aufgezeigt. Die zugrunde gelegten Einwirkungsgrößen (Spannungen) unter Beachtung der jeweiligen Abmessungsverhältnisse des Hauptträgers sowie die Ergebnisse der Einzelnachweise und des Interaktionsnachweises sind dem Anhang B 7 zu entnehmen.

Bei der Nachweisführung ist zu beachten, dass infolge der Laststellung $x=0\text{m}$ die Spannung aus konzentrierter Lasteinleitung σ_z nicht berücksichtigt werden muss, da diese keine Wirkung im betrachteten Gesamtfeld ($x=5\text{m}$ bis $x=9,6\text{m}$) hervorruft.

Festlegung der Ausgangsdaten:

• 1 Nachweis: Gesamtfeld (unversteift)

Feldlänge: 500cm

Feldhöhe: 140cm (idealisierte Beulfeldhöhe)

Für den Nachweis unter konzentrierter Lasteinleitung σ_z :

β : 0,084

α : 0,28

k : 100 (Abbildung 62)

• 2 Nachweis: Teilfeld 1 und Teilfeld 2 ohne Längssteifen

Aufgrund der zusätzlichen Quersteife müssen die Nachweise getrennt für die beiden Teilfelder erfolgen. Dabei wird im Teilfeld 1 die Laststellung $x=6,5\text{m}$ nicht berücksichtigt, da diese in ihrer Wirkung nicht maßgebend ist. Im Teilfeld 2 hingegen wird die Laststellung $x=7,5\text{m}$ nicht berücksichtigt, da diese keine Spannungen im betrachteten Teilfeld erzeugt.

Teilfeld 1

Feldlänge: 250cm

Feldhöhe: 148cm (idealisiert)

β : 0,168

α : 0,59

k : 8,5

Teilfeld 2

Feldlänge 210cm

Feldhöhe: 122cm (idealisiert)

β : 0,2

α : 0,58

k : 8,5

• 3 Nachweis: Teilfeld 1 und Teilfeld 2 zusätzlich längsversteift

Für diesen Nachweis unterscheiden sich die Beulfeldabmessungen in Abhängigkeit der Laststellung. Die Wirkung der Längssteife wird für $x=0\text{m}$ berücksichtigt, die Abmessungen des Beulfeldes entsprechen denen des vorangegangenen Nachweises. Für $x=6,5\text{m}$ und $x=7,5\text{m}$ im jeweilig betrachteten Teilfeld wird die Beulfeldhöhe infolge der hauptsächlichen Wirkung aus konzentrierter Lasteinleitung auf das Maß zwischen Untergurt und Längssteife begrenzt. Im Konkreten bedeutet dies:

Teilfeld 1 (für LS $x=0\text{m}$)

Feldlänge: 250cm

Feldhöhe: 148cm

k_{σ} : 42,8

k_{τ} : 35

Teilfeld 2 (für LS $x=0\text{m}$)

Feldlänge 210cm

Feldhöhe: 122cm

k_{σ} : 42,8

k_{τ} : 36

Teilfeld 1 (für LS $x=6,5\text{m}/7,5\text{m}$)

Feldlänge: 250cm

Feldhöhe: 108cm

β : 0,168

α : 0,43

k : 30

Teilfeld 2 (für LS $x=6,5\text{m}/7,5\text{m}$)

Feldlänge 210cm

Feldhöhe: 82cm

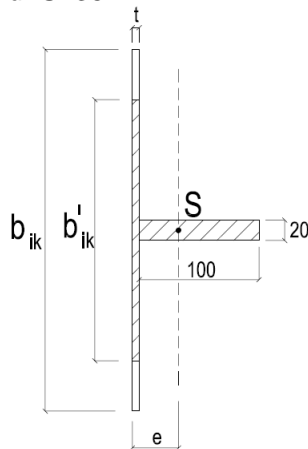
β : 0,2

α : 0,39

k : 40

Zur Berücksichtigung der Wirkung der Längssteife auf die Werte der idealen Beulspannung ergibt sich (die Längssteife wird 400mm vom Obergurt eingerückt positioniert):

Für S235:



$$b_{ik} = 40 \text{ cm}$$

$$b'_{ik} = 0,605 \cdot t \cdot \lambda_a \cdot \left(1 - 0,133 \cdot \frac{t \cdot \lambda_a}{b_{ik}} \right)$$

$$b'_{ik} = 0,605 \cdot 0,8 \cdot 92,9 \cdot \left(1 - 0,133 \cdot \frac{0,8 \cdot 92,9}{40} \right) = 33,85$$

$$z_s = \frac{33,85 \cdot 0,8 \cdot 0,4 + 10 \cdot 2 \cdot 5,8}{33,85 \cdot 0,8 + 10 \cdot 2} = 2,69$$

Für das Stegblech wird die minimale Dicke von 8mm herangezogen

$$I_L = \frac{33,85 \cdot 0,8^3}{12} + \frac{2 \cdot 10^3}{12} + 33,85 \cdot 0,8 \cdot 2,29^2 + 10 \cdot 2 \cdot 3,11^2 = 503,5 \text{ cm}^4$$

Für Teilfeld 1:

$$\gamma_L = 10,92 \cdot \frac{I_L}{t^3 \cdot b_G} = 10,92 \cdot \frac{503,5}{0,8^3 \cdot 250} = 43,1$$

$$\delta_L = \frac{A_s}{b_G \cdot t} = \frac{10 \cdot 2}{250 \cdot 0,8} = 0,10$$

$$\alpha = 1,69$$

$$k_\sigma = 42,8 \quad \text{Beulwerte unter Berücksichtigung der Längssteife}$$

$$k_\tau = 35,0$$

Für Teilfeld 2:

$$\gamma_L = 10,92 \cdot \frac{I_L}{t^3 \cdot b_G} = 10,92 \cdot \frac{503,5}{0,8^3 \cdot 210} = 51,29$$

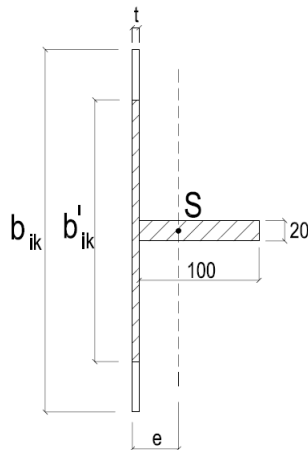
$$\delta_L = \frac{A_s}{b_G \cdot t} = \frac{10 \cdot 2}{210 \cdot 0,8} = 0,12$$

$$\alpha = 1,72$$

$$k_\sigma = 42,8$$

$$k_\tau = 36,0$$

Für S355:



$$b_{ik} = 40 \text{ cm}$$

$$b'_{ik} = 0,605 \cdot t \cdot \lambda_a \cdot \left(1 - 0,133 \cdot \frac{t \cdot \lambda_a}{b_{ik}} \right)$$

$$b'_{ik} = 0,605 \cdot 0,8 \cdot 75,9 \cdot \left(1 - 0,133 \cdot \frac{0,8 \cdot 75,9}{40} \right) = 29,32$$

$$z_s = \frac{29,32 \cdot 0,8 \cdot 0,4 + 10 \cdot 2 \cdot 5,8}{29,32 \cdot 0,8 + 10 \cdot 2} = 2,90$$

$$I_L = \frac{29,32 \cdot 0,8^3}{12} + \frac{2 \cdot 10^3}{12} + 29,32 \cdot 0,8 \cdot 2,5^2 + 10 \cdot 2 \cdot 2,9^2 = 505 \text{ cm}^4$$

Für Teilfeld 1:

$$\gamma_L = 10,92 \cdot \frac{I_L}{t^3 \cdot b_G} = 10,92 \cdot \frac{505}{0,8^3 \cdot 250} = 43,1$$

$$\delta_L = \frac{A_s}{b_G \cdot t} = \frac{10 \cdot 2}{250 \cdot 0,8} = 0,10$$

$$\alpha = 1,69$$

$$k_\sigma = 42,8 \quad \text{Beulwerte unter Berücksichtigung der Längssteife}$$

$$k_\tau = 35,0$$

Für Teilfeld 2:

$$\gamma_L = 10,92 \cdot \frac{I_L}{t^3 \cdot b_G} = 10,92 \cdot \frac{505}{0,8^3 \cdot 210} = 51,29$$

$$\delta_L = \frac{A_s}{b_G \cdot t} = \frac{10 \cdot 2}{210 \cdot 0,8} = 0,12$$

$$\alpha = 1,72$$

$$k_\sigma = 42,8$$

$$k_\tau = 36,0$$

Ergebnisse der analytischen Berechnung

In Diagramm 27 bis Diagramm 43 zusammengefasst wird die Beulgefährdung für die möglichen Materialdickenkombinationen in Abhängigkeit der Laststellung dargestellt. Dazu wurden die Ergebnisse des Interaktionsnachweises im Verhältnis zur Aufdickungslänge im Obergurt linear interpoliert. Grund dafür ist, dass die Aufdickung im Obergurt zu einer Veränderung des Spannungsverhältnisses sorgt und somit auch auf die Beulgefährdung im Stegblech Einfluss nimmt. Exemplarisch soll an einem Beispiel das Interpolieren der Beulwerte im Verhältnis der Aufdickungslänge aufgezeigt werden:

Beispiel: Ergebnis INW für $t_{OG}=35\text{mm}$: 0,65
 Ergebnis INW für $t_{OG}=20\text{mm}$: 0,89
 Aufdickung 35mm mit einer Länge von 700mm
 Untersuchte Beulfeldlänge: 2100mm

Die Korrektur des Beulwertes für $t_{OG}=20\text{mm}$ durch Beachtung der Aufdickung ergibt sich mit:

$$INW_{\text{Interpoliert}} = 0,89 - \left((0,89 - 0,65) \cdot \left(\frac{700}{2100} \right) \right) = 0,81$$

Die Werte der im Folgenden aufgezeigten Diagramme können dem Anhang B entnommen werden.

Legende:	— $x = 0\text{m}$
gilt für unaus-	— $x = 6,5\text{m}$
gesteifte GF	— $x = 7,5\text{m}$
	— $INW < 1,0$

6. Variantenuntersuchung Vorbauschabel

• S235, Gesamtfeld $x=5m$ bis $x=10m$, unversteift

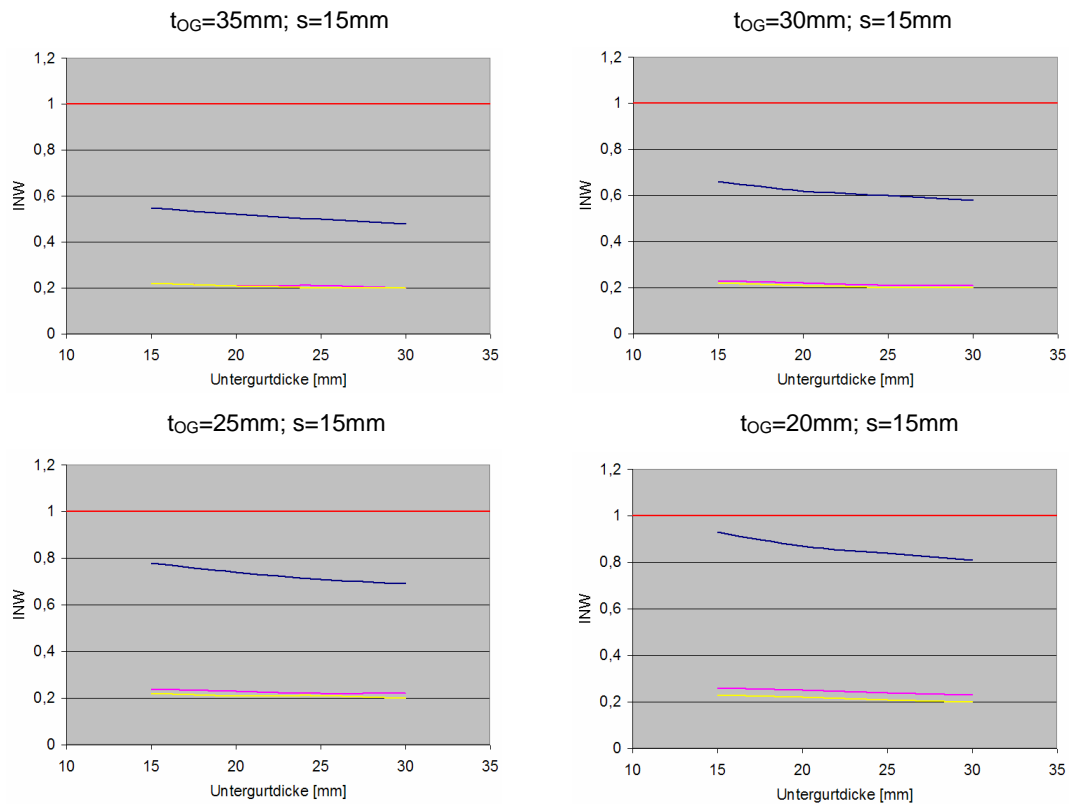


Diagramm 27: Ergebnisse interpolierter INW für $s=15mm$ in S235, unversteift

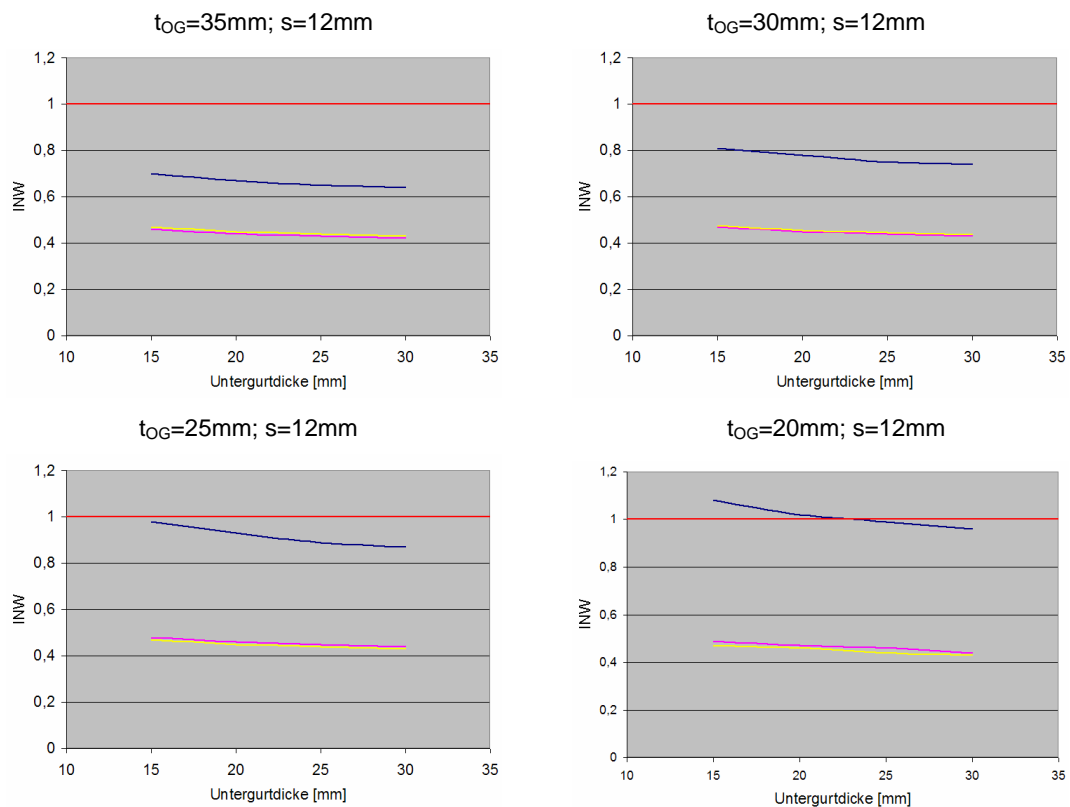


Diagramm 28: Ergebnisse interpolierter INW für $s=12mm$ in S235, unversteift

6. Variantenuntersuchung Vorbauschnabel

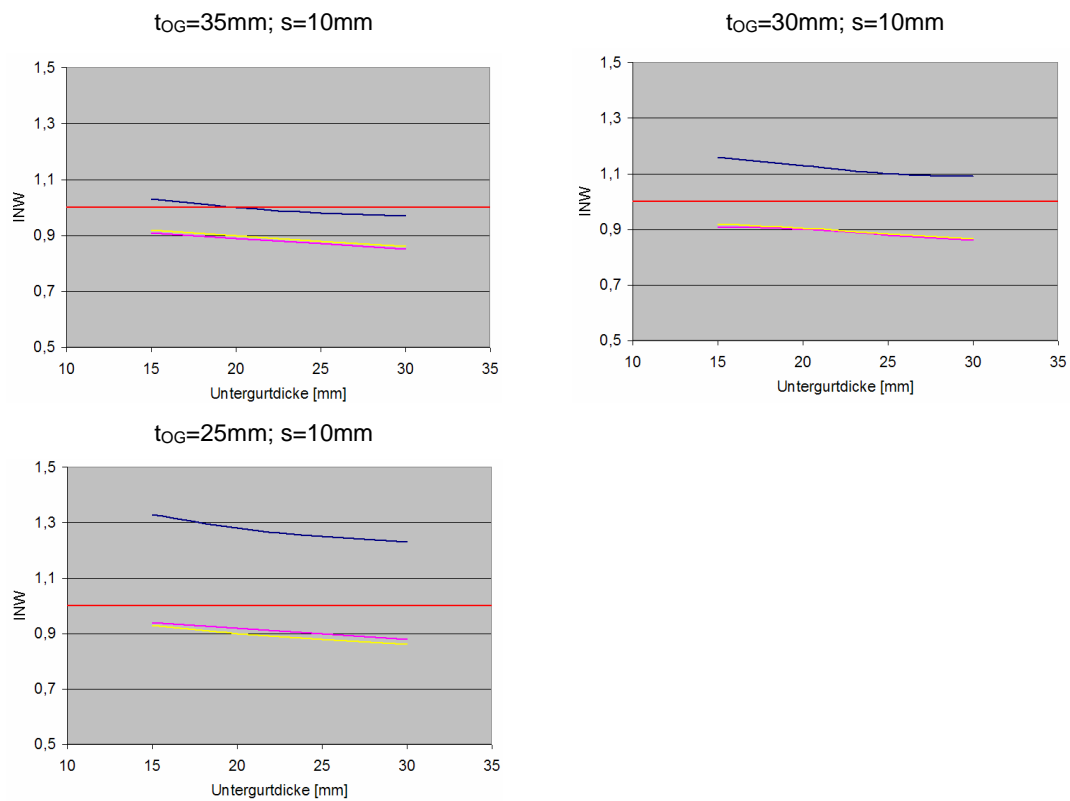


Diagramm 29: Ergebnisse interpolierter INW für $s=10\text{mm}$ in S235, unversteift

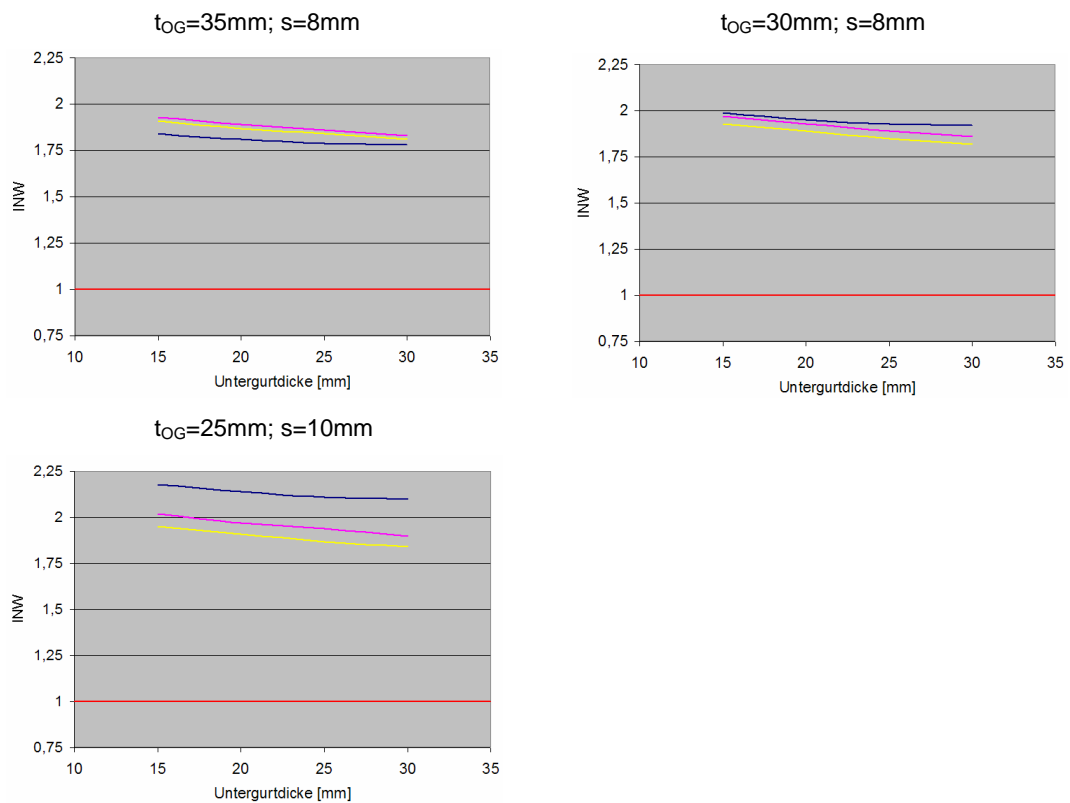


Diagramm 30: Ergebnisse interpolierter INW für $s=8\text{mm}$ in S235, unversteift

6. Variantenuntersuchung Vorbauschabel

• S355, Gesamtfeld $x=5m$ bis $x=10m$, unversteift

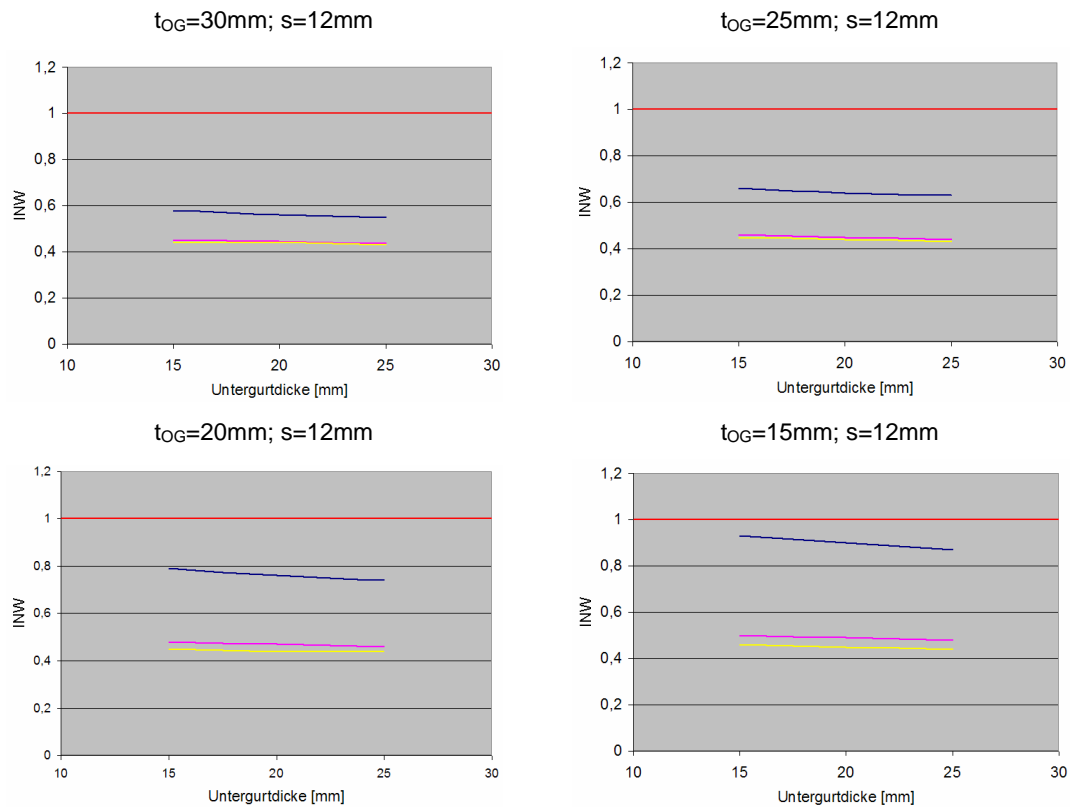


Diagramm 31: Ergebnisse interpolierter INW für $s=12mm$ in S355, unversteift

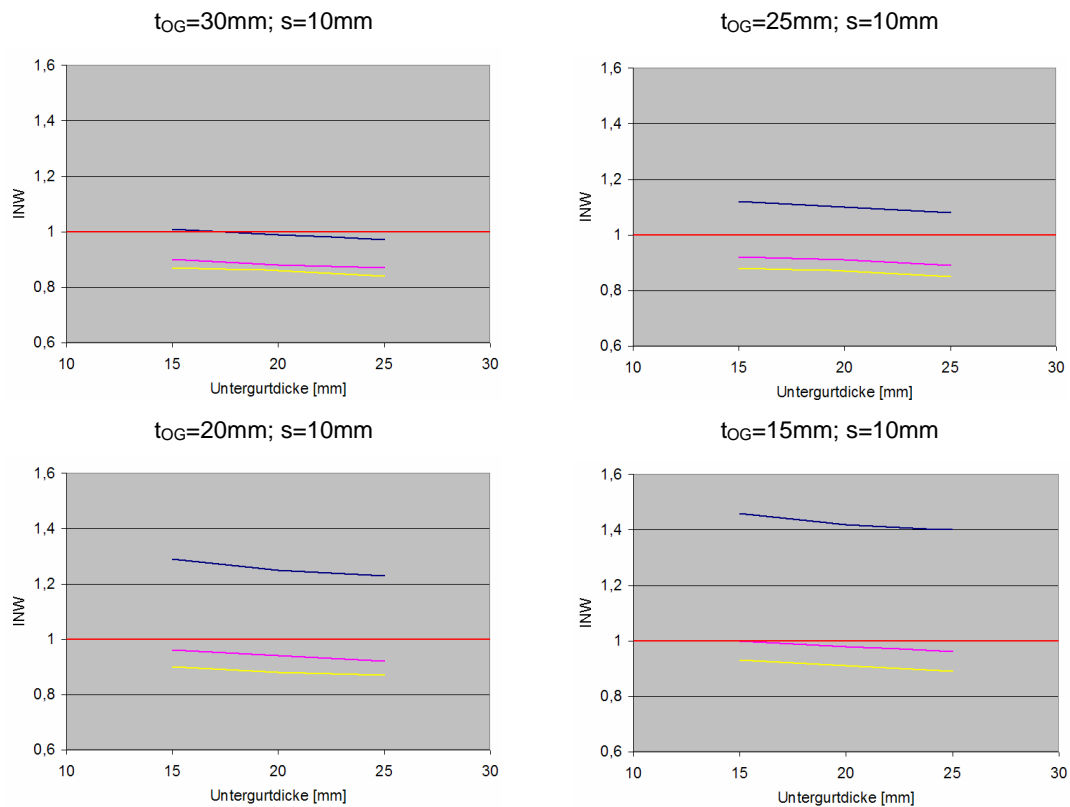


Diagramm 32: Ergebnisse interpolierter INW für $s=10mm$ in S355, unversteift

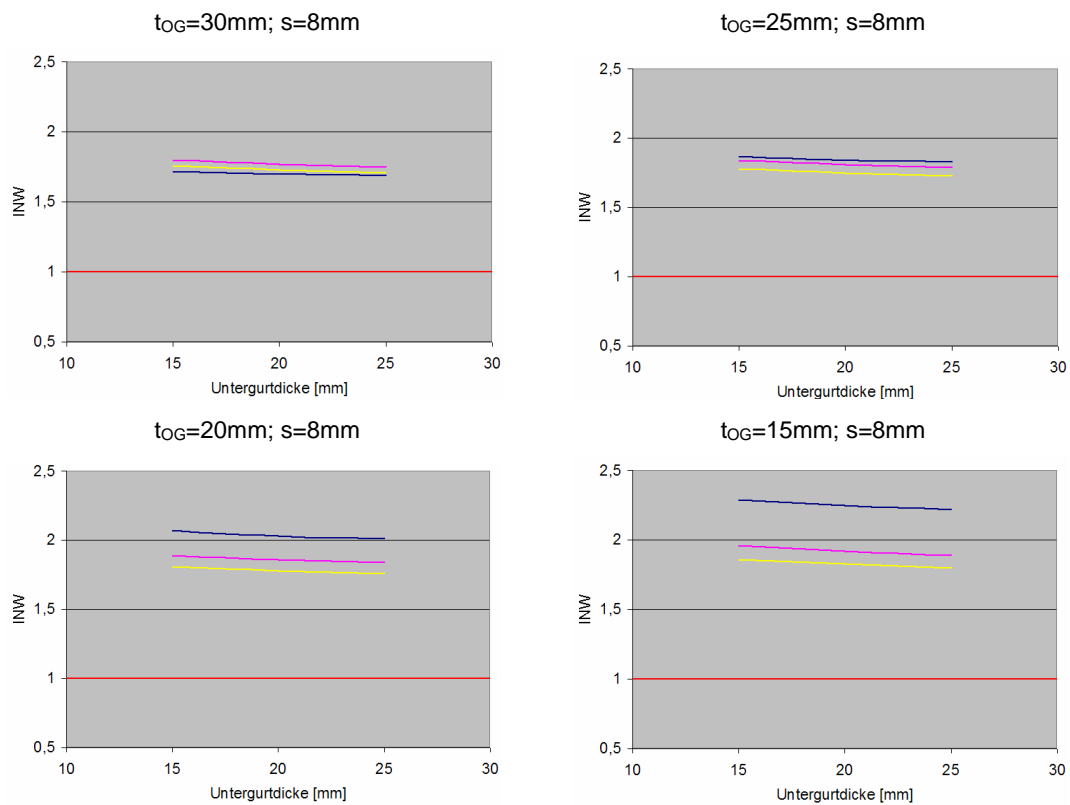


Diagramm 33: Ergebnisse interpolierter INW für $s=8\text{mm}$ in S355, unausgesteift

• Beulwerte S235, mit zusätzlicher Quersteife bei $x=7,1\text{m}$

Legende:

- $x=0\text{m}$ TF1
- $x=0\text{m}$ TF2
- $x=6,5\text{m}$ TF2
- $x=7,5\text{m}$ TF1
- $\text{INW} < 1,0$

gilt für ausge-
steiftes TF

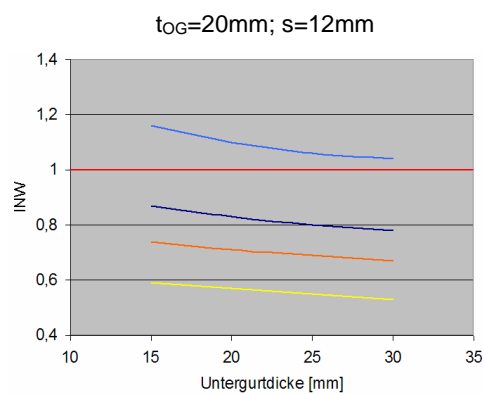


Diagramm 34: Ergebnisse interpolierter INW für $s=12\text{mm}$ in S235, mit Quersteife

6. Variantenuntersuchung Vorbauschabel

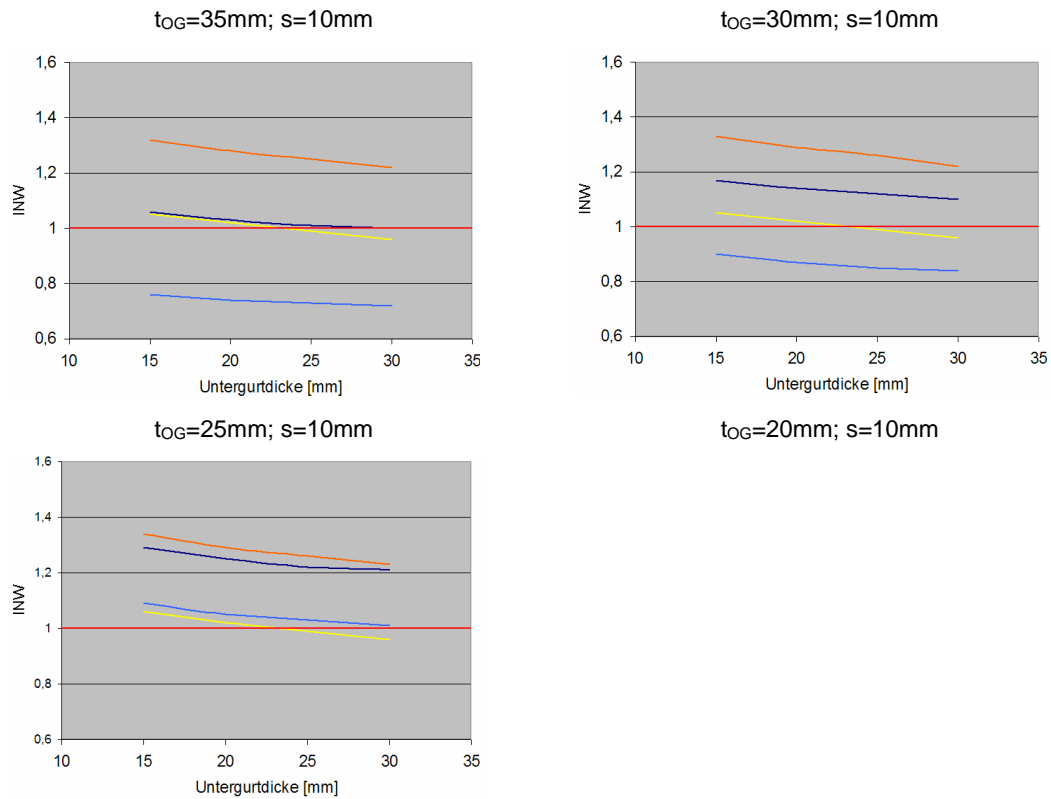


Diagramm 35: Ergebnisse interpolierter INW für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quersteife

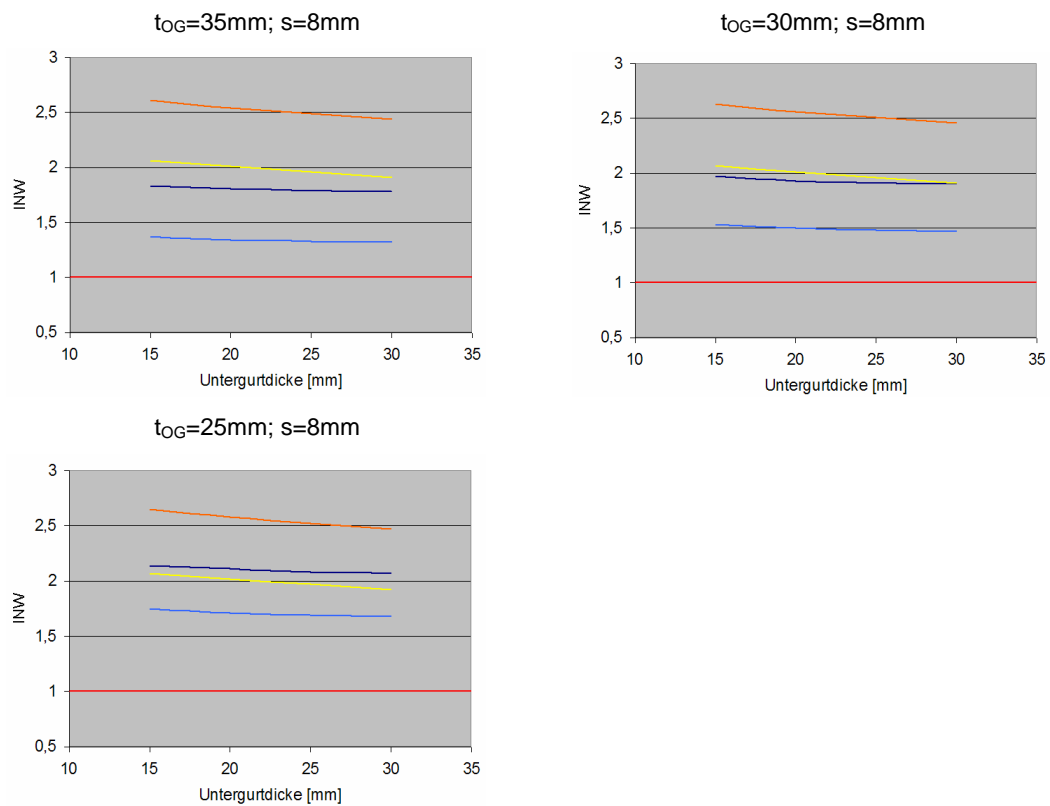


Diagramm 36: Ergebnisse interpolierter INW für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quersteife

6. Variantenuntersuchung Vorbauschabel

• Beulwerte S355, mit zusätzlicher Quersteife bei $x=7,1m$

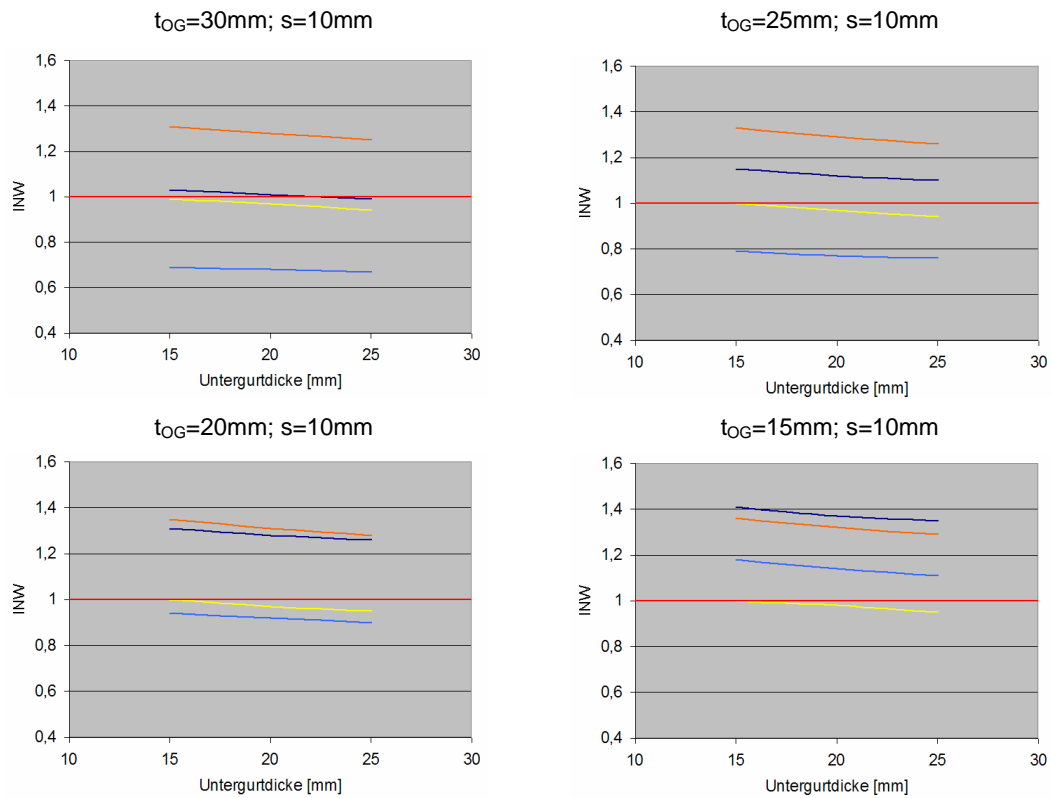


Diagramm 37: Ergebnisse interpolierter INW für $s=10mm$ in S355, mit Quersteife

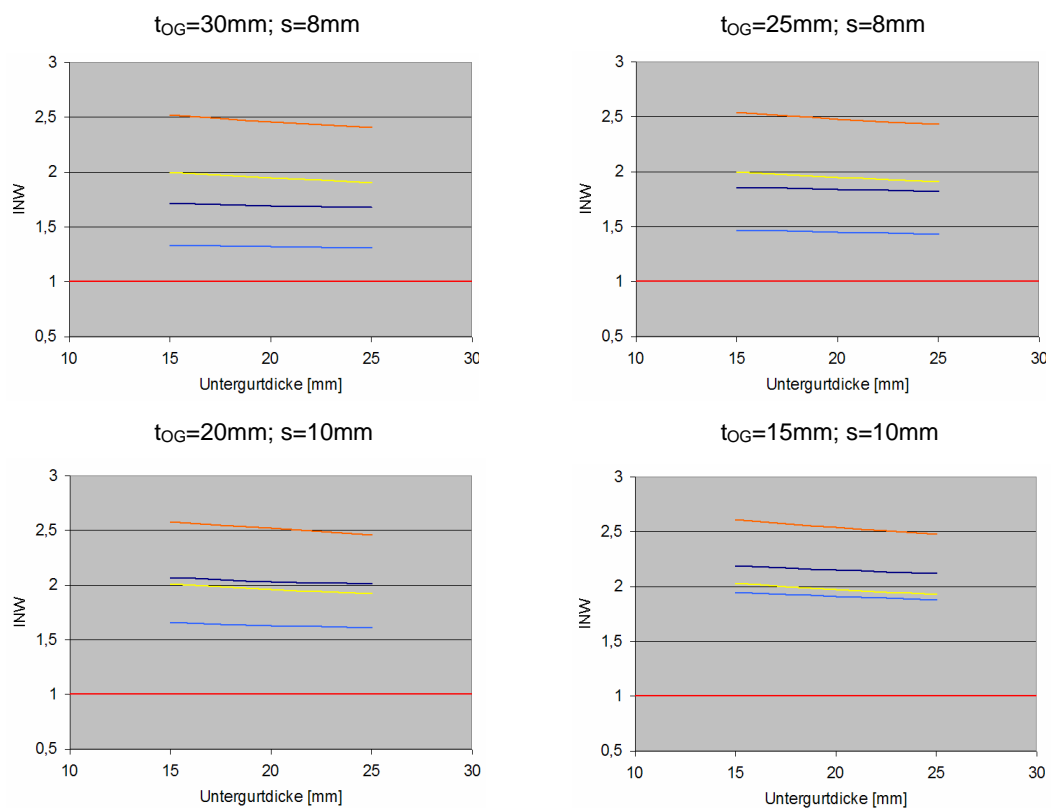


Diagramm 38: Ergebnisse interpolierter INW für $s=8mm$ in S355, mit Quersteife

• Beulwerte S235 mit Quersteife bei $x=7,1\text{m}$ und Längssteife im betrachteten Teilfeld

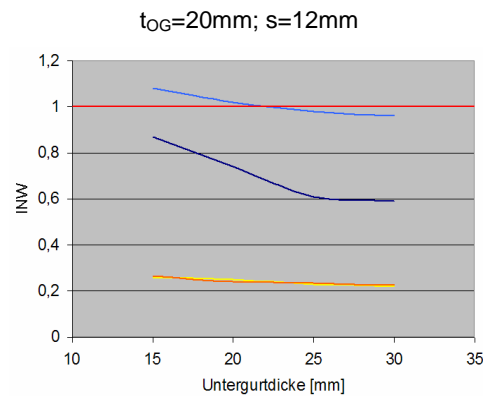


Diagramm 39: Ergebnisse interpolierter INW für $s=12\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife

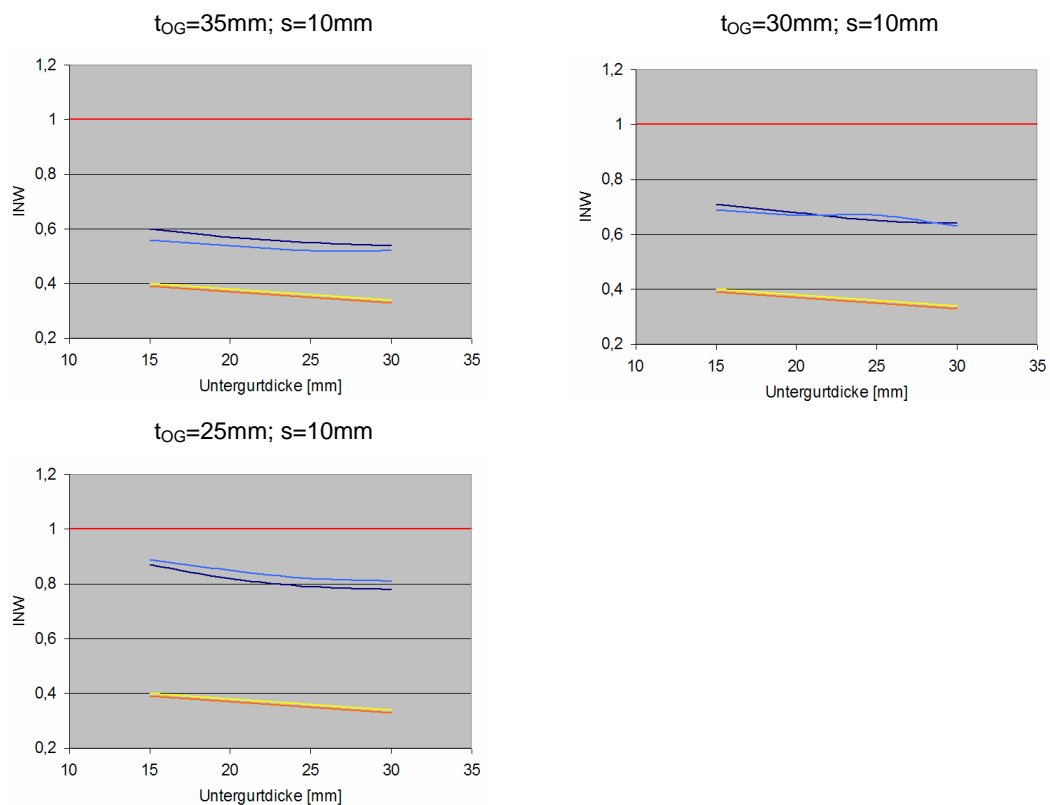


Diagramm 40: Ergebnisse interpolierter INW für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife

6. Variantenuntersuchung Vorbauschnabel

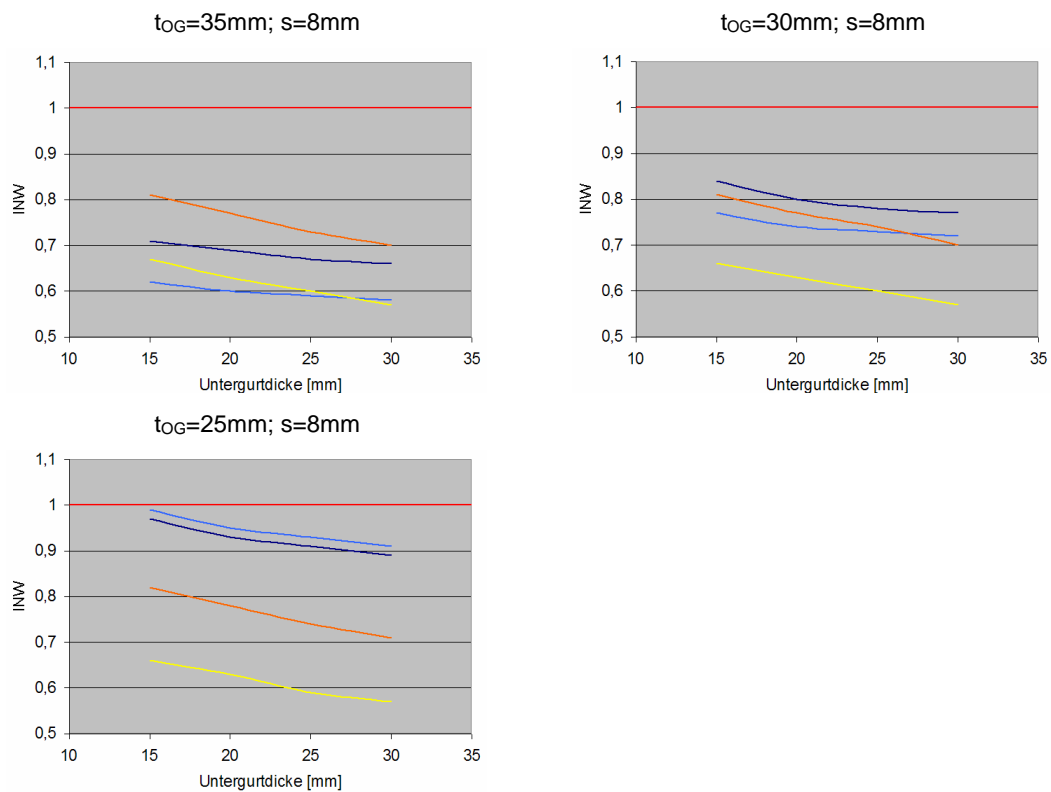


Diagramm 41: Ergebnisse interpolierter INW für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife

• Beulwerte S355 mit Quersteife bei $x=7,1\text{m}$ und Längssteife im betrachteten Teilfeld

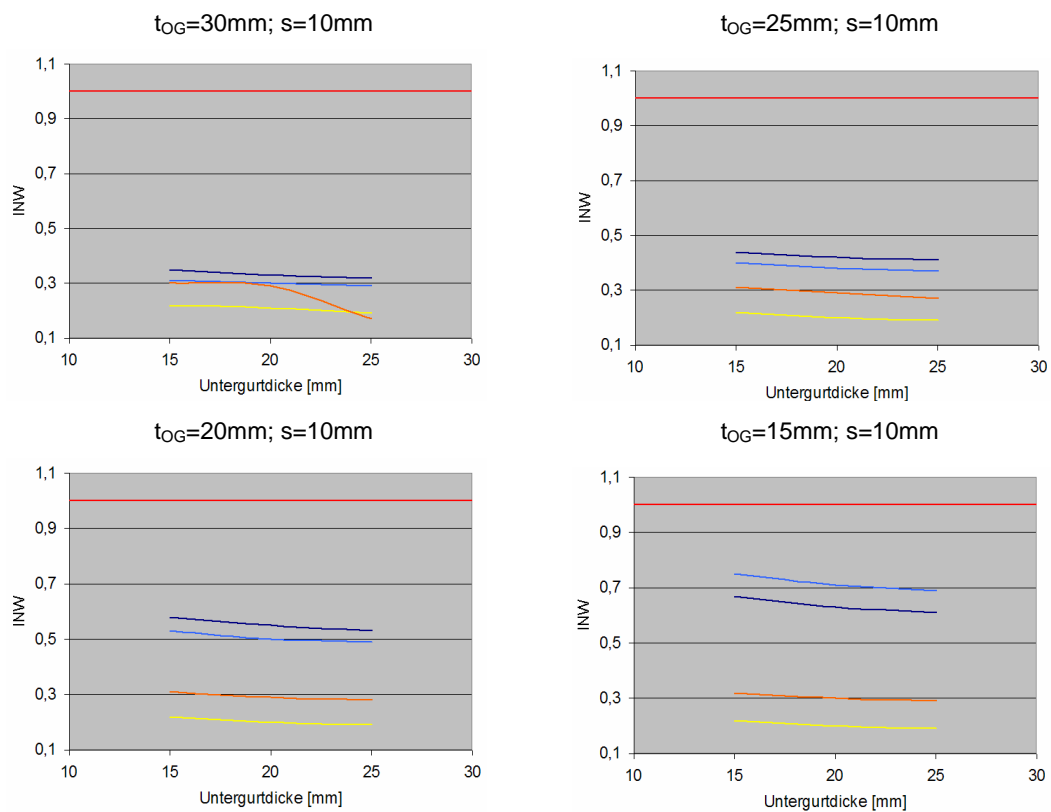


Diagramm 42: Ergebnisse interpolierter INW für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife

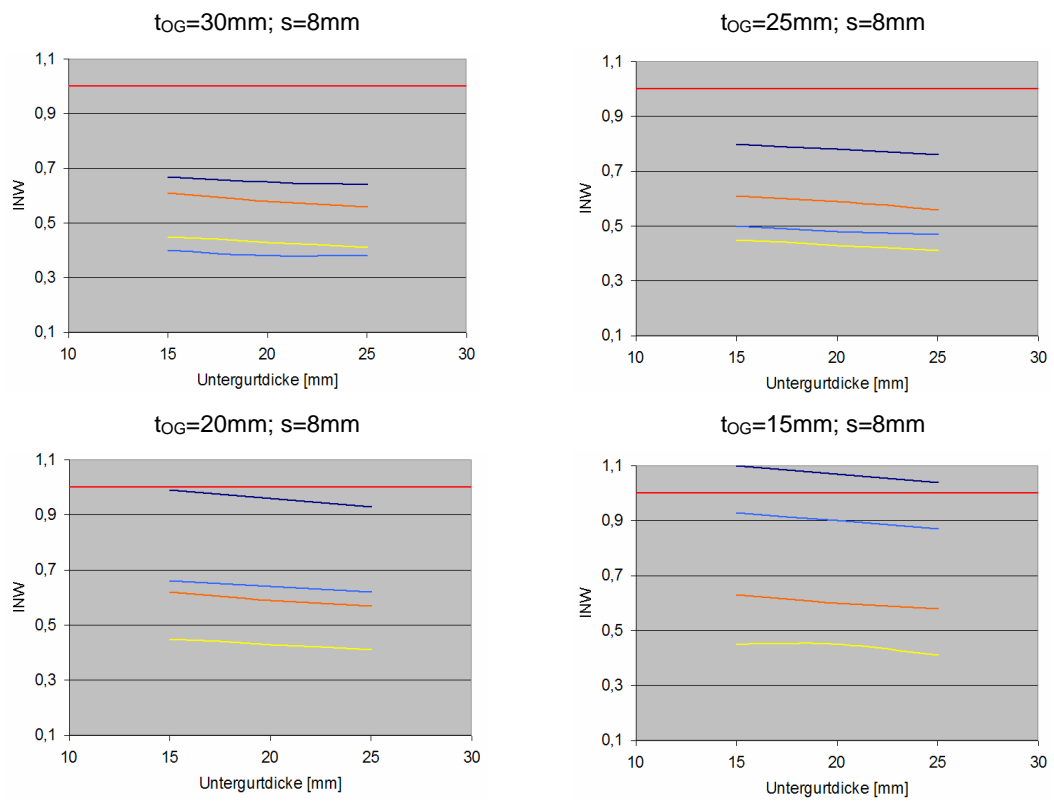


Diagramm 43: Ergebnisse interpolierter INW für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife

Zusammenfassung der Beuluntersuchung

Zusammenfassend wird in Tabelle 41 und Tabelle 42 die Aussteifenden Maßnahmen nach analytischer Berechnungsmethode aufgezeigt.

Materialdicke [mm]			Aussteifungsmaßnahmen ¹⁾
Steg	Untergurt	Obergurt	
12 mm	20 mm	35 mm	keine
		30 mm	keine
		25 mm	keine
		20 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
	15 mm	35 mm	keine
		30 mm	keine
		25 mm	keine
		20 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
10 mm	30 mm	35 mm	keine
		30 mm	Quersteife + Längssteife TF1
		25 mm	Quersteife + Längssteife TF1
	25 mm	35 mm	keine
		30 mm	Quersteife + Längssteife TF1
		25 mm	Quersteife + Längssteife TF1
	20 mm	35 mm	keine
		30 mm	Quersteife + Längssteife TF1
		25 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
	15 mm	35 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		30 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		25 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
8 mm	30 mm	35 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		30 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		25 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
	25 mm	35 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		30 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		25 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
	20 mm	35 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		30 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		25 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
	15 mm	35 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		30 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		25 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
¹⁾ nicht aufgelistete Varianten sind unversteift auszuführen			

Tabelle 41: Zusammenfassung der zusätzlichen Aussteifungsmaßnahmen zur Sicherstellung der Beulsicherheit für S235 nach analytischer Berechnung

Materialdicke			Aussteifungsmaßnahmen ¹⁾
Steg	Untergurt	Obergurt	
12 mm	25 mm	30 mm	keine
		25 mm	keine
		20 mm	keine
		15 mm	keine
	20 mm	30 mm	keine
		25 mm	keine
		20 mm	keine
		15 mm	keine
	15 mm	30 mm	keine
		25 mm	keine
		20 mm	keine
		15 mm	keine
10 mm	25 mm	30 mm	keine
		25 mm	Quersteife + Längssteife TF1
		20 mm	Quersteife + Längssteife TF1
		15 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
	20 mm	30 mm	keine
		25 mm	Quersteife + Längssteife TF1
		20 mm	Quersteife + Längssteife TF1
		15 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
	15 mm	30 mm	Quersteife + Längssteife TF1
		25 mm	Quersteife + Längssteife TF1
		20 mm	Quersteife + Längssteife TF1
		15 mm	Quersteife + Längssteife TF1
8 mm	25 mm	30 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		25 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		20 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		15 mm	- ²⁾
	20 mm	30 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		25 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		20 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		15 mm	- ²⁾
	15 mm	30 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		25 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		20 mm	Quersteife + Längssteife TF1/TF2
		15 mm	- ²⁾
¹⁾ nicht aufgelistete Varianten sind unversteift auszuführen			
²⁾ Stabilitätsnachweis nicht erbracht, Variante nicht möglich			

Tabelle 42: Zusammenfassung der zusätzlichen Aussteifungsmaßnahmen zur Sicherstellung der Beulsicherheit für S355 nach analytischer Berechnung

6.3.4.2 Nachweis Biegedrillknicken

FEM-Berechnung

Bei der Versagensform des Biegedrillknickens weicht der Druckgurt infolge des Biegemoments unter gleichzeitiger Verdrehung seitlich aus. Es soll aufgezeigt werden, unter welchen Bedingungen dieser Versagensfall auftritt und ob dieser maßgebend für die Bemessung ist.

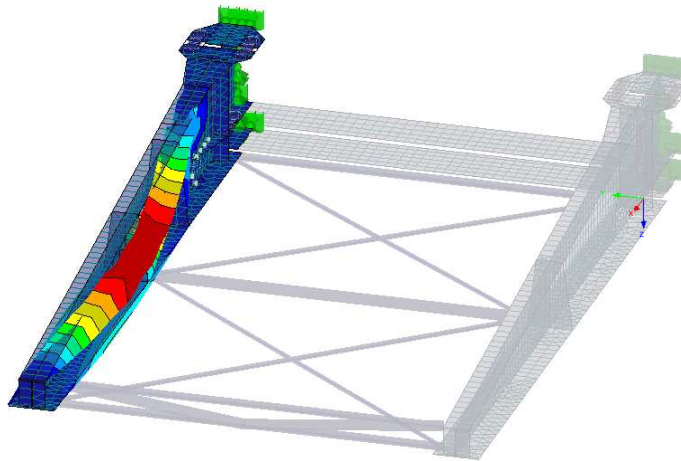


Abbildung 92: Darstellung des Biegedrillknickens im FEM

In der dargestellten Abbildung 92 ist gut die Verdrehung unter gleichzeitigem seitlichen Ausweichen des Druckgurt zu erkennen. Jedoch wird dieser Versagensfall als erste Eigenform nur dann angezeigt, wenn der Steg ausreichend dick ausgebildet wird. Um den in der Abbildung dargestellten Fall zu erhalten, ist eine Stegdicke von 22mm in S235 notwendig. Bei geringeren Stegdicken wird als erste Eigenform stets der Stabilitätsfall Plattenbeulen maßgebend. Jedoch sind die Ergebnisse stark von den Lagerungsbedingungen im Anschlussbereich abhängig. Das heißt, je größer die Nachgiebigkeit im Anschlussbereich, desto geringer fallen die Werte der Verzweigungslast aus und desto eher werden Stabilitätsfälle maßgebend. In DIN 18800-2 (118) wird darauf aufmerksam gemacht, dass der Schlupf der Schraubverbindung bei der Untersuchung der Stabilität zu berücksichtigen ist. Da jedoch der Anschluss als Passverbindung ausgeführt wird und damit ein maximaler Schlupf von 0,3mm zu berücksichtigen ist, kann der Einfluss als vernachlässigbar angesehen werden.

Die Verzweigungslastfaktoren des Biegedrillknickens sind in der nachfolgenden Tabelle 43 aufgelistet. Dabei sind nur die Materialdickenkombinationen berücksichtigt, bei denen Biegedrillknicken als erste Eigenform auftritt.

Dicke Steg [mm]	Dicke UG [mm]	Dicke OG [mm]	Material	η_{Ki}
22	30	15	S 235	3,32
22	30	20	S 235	3,98
22	30	25	S 235	4,67
22	30	30	S 235	5,33
22	20	30	S 235	5,03
22	20	25	S 235	4,37

Tabelle 43: Verzweigungslastfaktor für den Versagensfall Biegedrillknicken

Es ist zu erkennen, dass die Verzweigungslastfaktor η_{Ki} deutlich über 1,0 liegen und somit dieser Versagensfall nicht als maßgebend angesehen werden kann. Der Grund für diese hohen Verzweigungslastfaktoren ist mit den Einspannbedingungen des Vorbauschnabels zu begründen. Der Anschlussbereich zwischen Vorbauschnabel und Brückenkonstruktion kann als feste Einspannung angesehen werden, die Schnabelspitze mit den beiden Verbandsebenen als Gabellagerung.

Analytische Berechnung

Zur analytischen Nachweisführung sind diese Lagerungsbedingungen nach DIN 18800-2 jedoch schwer zu erfassen, da in der Norm stets von einer Gabellagerung an beiden Enden ausgegangen wird und für abweichende Lagerungsbedingungen keine Ansätze vorliegen.

Um das Biegedrillknickproblem zu lösen, besteht die Möglichkeit, andere Rechenprogramme zu nutzen, bei denen die Lagerungsbedingungen individuell festgelegt werden können. Alternativ dazu ist es ein vereinfachter Biegedrillknicknachweis auf der sicheren Seite liegend vorstellbar. Dazu wird der Druckgurt sowie 1/5 des Steges gedanklich aus dem System geschnitten und es wird lediglich der Biegeknicknachweis am Ersatzstab unter Beachtung des Knicklängenbeiwertes β geführt. Um die Auflagerbedingungen zu erfassen, wird für die Knicklänge der 3. Eulersche Fall zugrunde gelegt. Der Vergleich (Abbildung 93) der Knickfigur im FEM mit dem 3. Eulerschen Fall nach DIN 18800-2 zeigt die Berechtigung dieser Annahme.

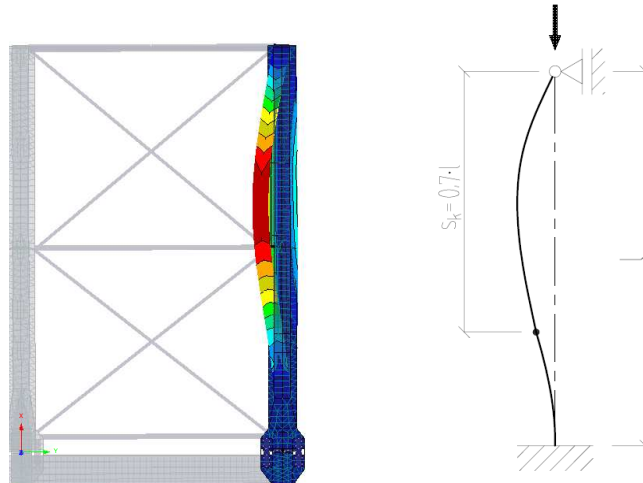


Abbildung 93: Vergleich FEM-Ergebnis mit 3. Eulerschen Fall

Die Festlegung des Querschnitts zum Nachweis auf Biegeknicken ist aufgrund der an den Schnittkraftverlauf angepassten Steghöhe schwierig. Daher wird der Querschnitt an der Stelle $x=3,5\text{m}$ als maßgebender angesetzt, da an diesem Punkt die Knickfigur ihre maximale Auslenkung erreicht. Das statische System zum Nachweis nach dem Ersatzstabverfahren kann der Abbildung 94 entnommen werden.

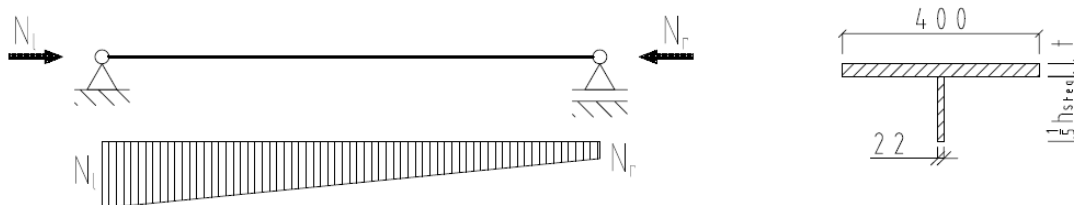


Abbildung 94: Statisches System für Ersatzstabverfahren

Der vereinfachte Nachweis des Druckgurtes als Druckstab erfolgt mit dem in DIN 18800-2 (310) sowie in DIN 18800-1 (740) beschriebenen Gleichungen.

$$i_{z,g} = \sqrt{\frac{I_z}{A - 0,6 \cdot A_{\text{Steg}}}}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{c \cdot k_c}{i_{z,g} \cdot \lambda_a}$$

$$\frac{0,843 \cdot M_y}{\kappa \cdot M_{pl,y,d}} \leq 1,0$$

Die Ergebnisse des Biegedrillknicknachweises sind in Tabelle 44 und Tabelle 45 zusammengefasst. Die Berechnungen können im Einzelnen dem Anhang B 8 entnommen werden.

Dicke OG [mm]	Dicke UG [mm]	Stegdicke [mm]	Nachweis
35	20	22	0,53
30	20	22	0,57
25	20	22	0,62
20	20	22	0,68
15	20	22	0,77

Tabelle 44: Ergebnis Biegedrillknicknachweis für S235 nach analytischer Berechnung

Dicke OG [mm]	Dicke UG [mm]	Stegdicke [mm]	Nachweis
35	20	15	0,41
30	20	15	0,44
25	20	15	0,48
20	20	15	0,55
15	20	15	0,64

Tabelle 45: Ergebnis Biegedrillknicknachweis für S355 nach analytischer Berechnung

Anhand der Werte in Tabelle 44 und Tabelle 45 zeigt sich, dass selbst mit Hilfe des vereinfachten BDK-Nachweises dieser Versagensfall nicht maßgebend ist. Zudem zeigt sich, dass die Wahl eines höherfesten Stahl hinsichtlich der Stabilitätsgefährdung auf Biegedrillknicken lediglich zu einer Differenz von 10% - 15% führt. Demzufolge ist die Wahl eines höherfesten Stahls bei maßgebender Stabilität aus wirtschaftlicher Sicht fraglich.

6.4 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

In diesem Kapitel wird beschrieben, welche Forderungen hinsichtlich der einzuhaltenden Verformungen an die Vorbauschnabelkonstruktion gestellt werden. Dabei sind sowohl die globalen als auch lokalen Verformungserscheinungen zu berücksichtigen. Die Begrenzung der maximalen Verformung resultiert aus dem Aufbau des Verschlusslagers. Dieses besteht aus einer hydraulischen Presse zur Anpassung der Höhe und Übernahme der Stahlkonstruktion, einen Kalottenlager zum Ausgleich von Drehwinkeln infolge Verformungen und aus dem eigentlichen Verschlusslager, bestehend aus einer massiven Stahlplatte mit innen liegender Neopren-, Federstahl- und PTFE-Schicht.

Um die Größe der Verformungsbeschränkung zu definieren, muss die Wirkung des Kalottenlagers als maßgebender Einfluss herangezogen werden. Wie bereits beschrieben, hat es die Aufgabe, die auftretenden Drehwinkel aus Verformungen aufzunehmen. Jedoch dürfen die Verdrehungen ein gewisses Maß nicht überschreiten, da ansonsten die Oberplatte von der Unterplatte „herausspringen“ kann. Das ist damit zu begründen, dass bei einer Verdrehung zur vertikalen Kraftkomponente auch eine horizontale Kraftkomponente hinzukommt, die dazu führt, dass die Oberplatte seitlich weggedrückt wird. Dieser Effekt ist in jedem Falle zu vermeiden, da dies auf der Baustelle zu erheblichen Verzögerungen beim Verschluss führt und zusätzlichen Arbeitsaufwand bedeutet. Weiterhin führen die Verformungen dazu, dass der Vorbauschnabelsteg als auch die PTFE-Gleitschicht zunehmend außermittig belastet werden. Dies kann dazu führen, dass aufgrund der einseitigen Pressung die PTFE Schicht auf einer Seite herausgedrückt wird und der Untergurt auf der Stahlplatte auflaufen kann. Die beiden Effekte sind in Abbildung 95 schematisch dargestellt.

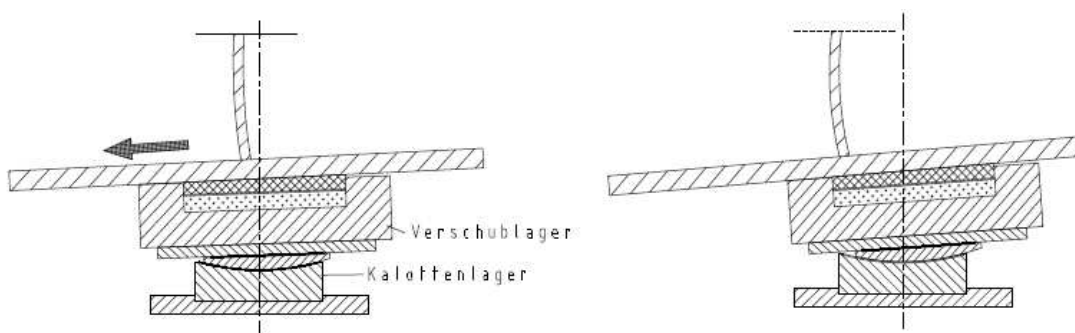


Abbildung 95: Abgleiten des Untergurts bei übermäßiger Verformung

Aus den Forderungen heraus müssen die Verdrehungen am Kalottenlager auf 1° Winkelverdrehung begrenzt werden. Das bedeutet im Konkreten, dass die Verformung u_z aus globaler Wirkung bezogen auf die Schnabelspitze auf 175mm und die Verformung u_z aus lokaler Wirkung bezogen auf den Abstand zwischen Außenkante des Untergurts und Mitte

Steg auf 6,2mm beschränkt werden muss (Abbildung 96). Zu beachten ist, dass die Beschränkungen nur für die Stelle gilt, an der sich das Verschlager befindet.

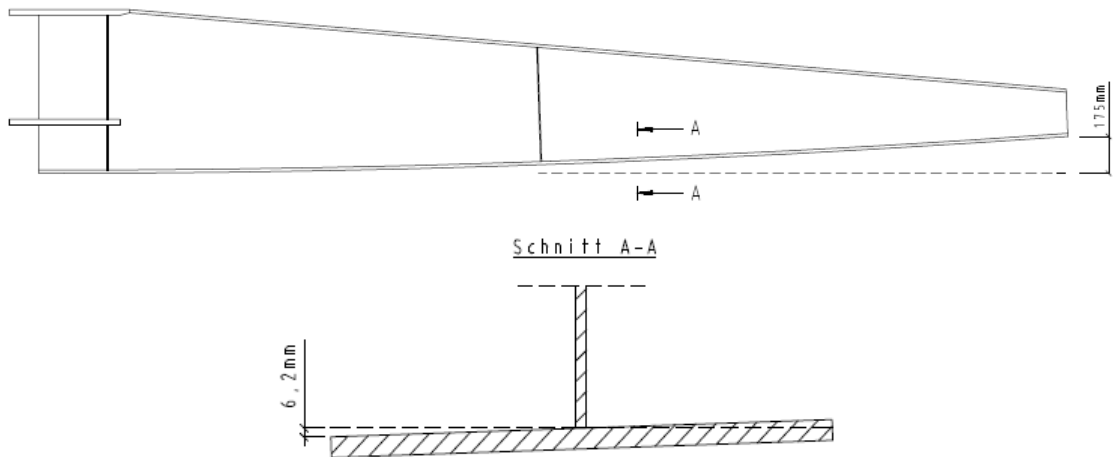


Abbildung 96: Verformungsbeschränkung für globale und lokale Verformung

6.4.1 Nachweis der globalen Verformung

Maßgebend für die Verformung aus globaler Wirkung ist die Laststellung $x=0\text{m}$. Die Ermittlung der Verformung erfolgt nach Theorie II.Ordnung. Da es sich bei der Bestimmung der Verformungen um einen Gebrauchstauglichkeitsnachweis handelt, ist für die Ermittlung der Auflagerreaktionen der Faktor γ_f mit 1,0 anzusetzen. Um nicht für jede Kombinationsmöglichkeit die Verformungen zu ermitteln, wird nur der Wert für die kleinste denkbare Abmessung aufgelistet. Überschreitet dieser Wert nicht die zulässige Verformungsgrenze, gilt der Nachweis aus globaler Wirkung als erbracht.

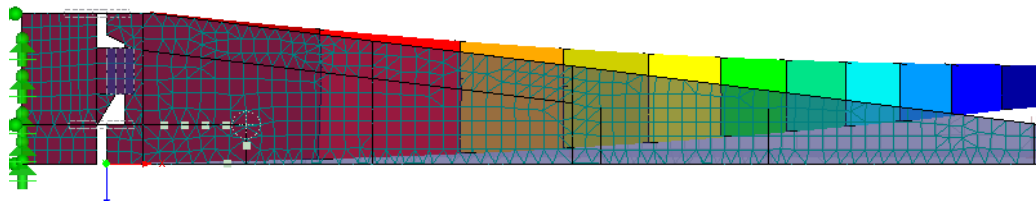


Abbildung 97: Darstellung der globalen Verformung im FEM

Hinsichtlich der Ergebnisauswertung der globalen Verformung des Hauptträgers nach der FE-Methode ist im gezeigten Modell zu berücksichtigen, dass die Verformung des modellierten Brückenfußpunktes von der Verformung des Gesamtsystems abzuziehen ist. Der Nachweis nach analytischer Berechnung wurde mit Hilfe des Stabwerksprogramms RSTAB unter Berücksichtigung der veränderlichen Biegesteifigkeit des Hauptträgers durchgeführt. Bei beiden Nachweisformen erfolgte die Ermittlung der Ergebnisse nach Theorie II.Ordnung (Tabelle 46).

Berechnungs- methode	Dicke Untergurt	Dicke Obergurt	Dicke Steg	u_z global [mm]
FEM	15	15	8	110,5
Analytisch	15	15	8	93,01

Tabelle 46: Ergebnisse der globalen Verformung nach Theorie II.Ordnung

6.4.2 Nachweis der lokalen Verformung

Den Gründen für lokale Verformungen können zwei Ursachen zugeordnet werden. Zum einen die muldenförmige Flanschverformung am Untergurt infolge Einwirkung des Verschublaggers unter Beachtung der entstehenden Außermittigkeit von 10mm. Zum anderen führt die Exzentrizität im Steg zu einer Biegung. Diese beiden Ursachen werden anhand von Abbildung 98 verdeutlicht.

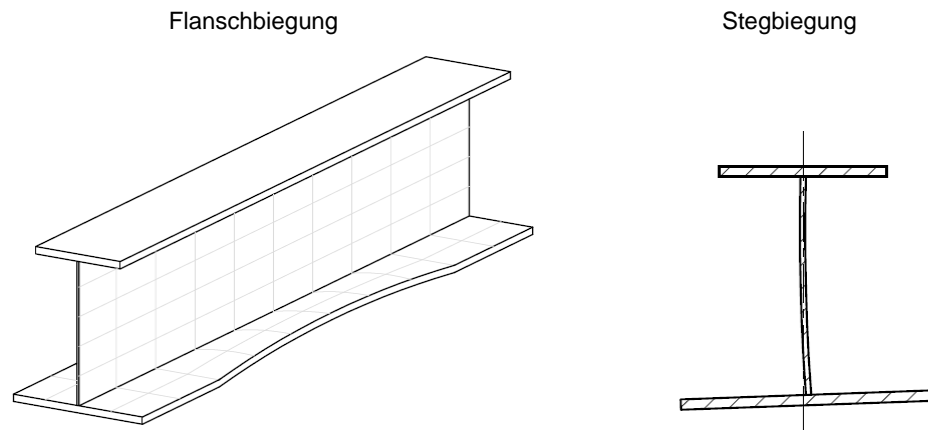


Abbildung 98: Lokale Verformung infolge Flansch- und Stegbiegung

FEM-Berechnung

Als maßgebend für die Bestimmung der Verformung am Untergurt wird die Laststellung $x=7,5\text{m}$, für die Variante mit $5,5\text{kN/m}$ Eigengewicht des VBS, zugrunde gelegt. Dies ist damit zu begründen, dass bei dieser Stellung die Größe der Einwirkung höher ausfällt, im Gegensatz zur Einwirkung an der Schnabelspitze. Eine Laststellung am Ende des Vorbauschnabels weist zwar die größte Einwirkung auf, jedoch muss die Aufdickung im Stegbereich berücksichtigt werden, die hinsichtlich der Verformung einen größeren Widerstand bietet.

Für die Bestimmung der Verformung am Untergurt wurden drei Fälle untersucht:

- Verformung ohne zusätzliche Versteifungen (Diagramm 44)
- Verformung mit zusätzlicher Versteifung (Rippe beidseitig, Größe $200 \times 400 \times 20$) im Bereich $x=0\text{m}$ bis $x=5\text{m}$ und $x=5\text{m}$ bis $x=10\text{m}$
- Verformung mit zusätzlicher Versteifung (Rippe beidseitig, Größe $200 \times 600 \times 20$) im Bereich $x=0\text{m}$ bis $x=5\text{m}$ und $x=5\text{m}$ bis $x=10\text{m}$

Fall 1: Verformung ohne zusätzliche Aussteifung

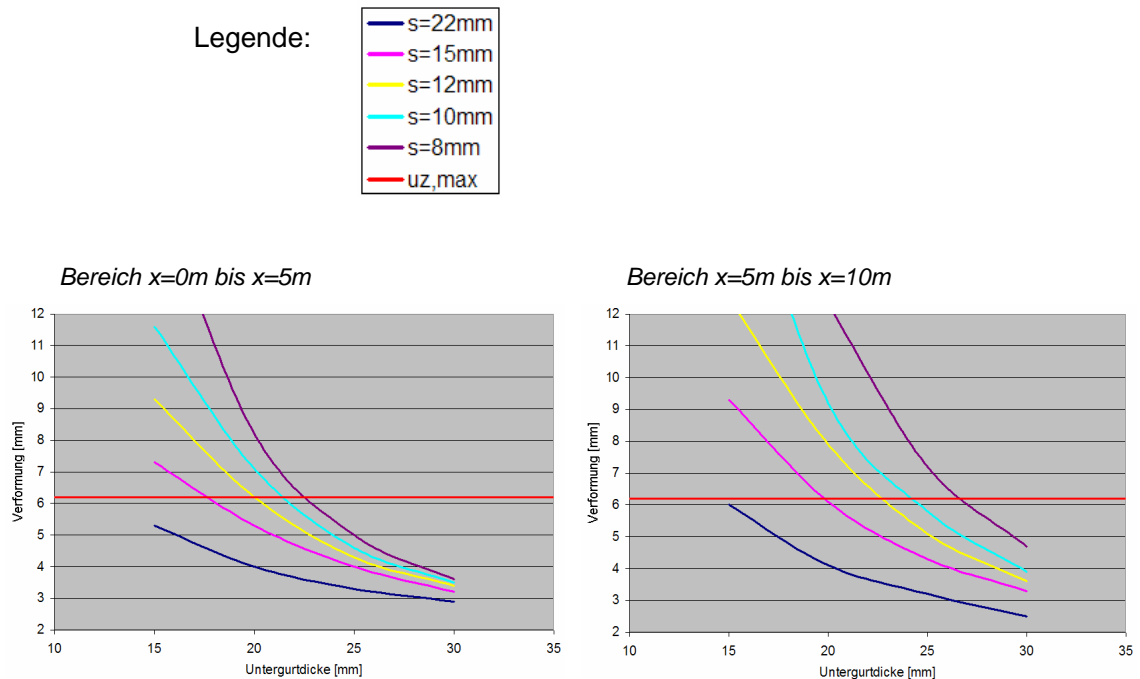


Diagramm 44: Lokale Verformung im Untergurt ohne zusätzliche Aussteifungen

Fall 2: Verformung mit zusätzliche Aussteifung

Es wurde untersucht, welchen Einfluss der Abstand der Aussteifung und die Rippengröße auf die lokale Verformung nimmt. Die Belastung wird jeweils in der Mitte der beiden zusätzlichen Aussteifungen aufgebracht. Die Untersuchung wurde nur für die Varianten geführt, bei denen ohne Aussteifung eine Verformungsüberschreitung erfolgte. Anhand von Diagramm 45 und Diagramm 46 kann die lokale Verformung mit zusätzlichen Aussteifungen abgelesen werden.

Legende zu Diagramm 45 und Diagramm 46:



• Bereich $x=0m$ bis $x=5m$

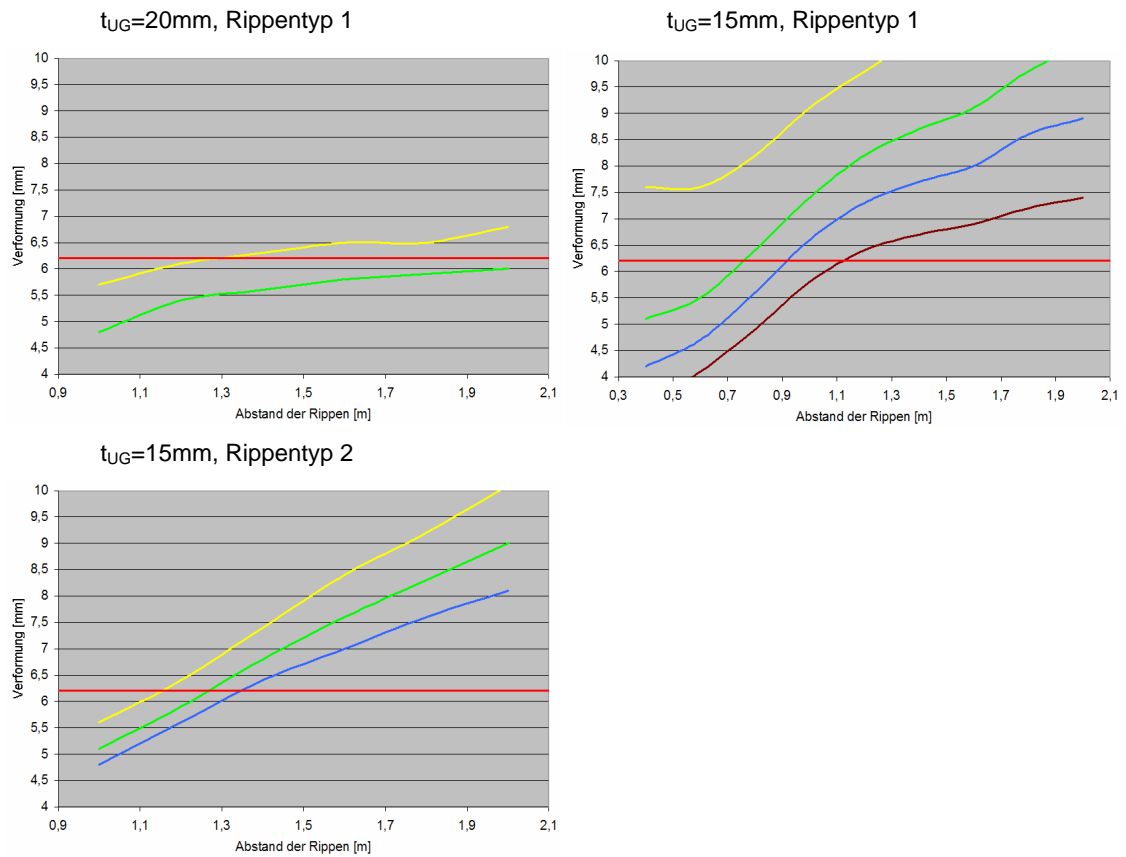


Diagramm 45: Verformung UG im Bereich $x=0m$ bis $x=5m$ mit zusätzlichen Rippen

6. Variantenuntersuchung Vorbauschnabel

• Bereich $x=5m$ bis $x=10m$

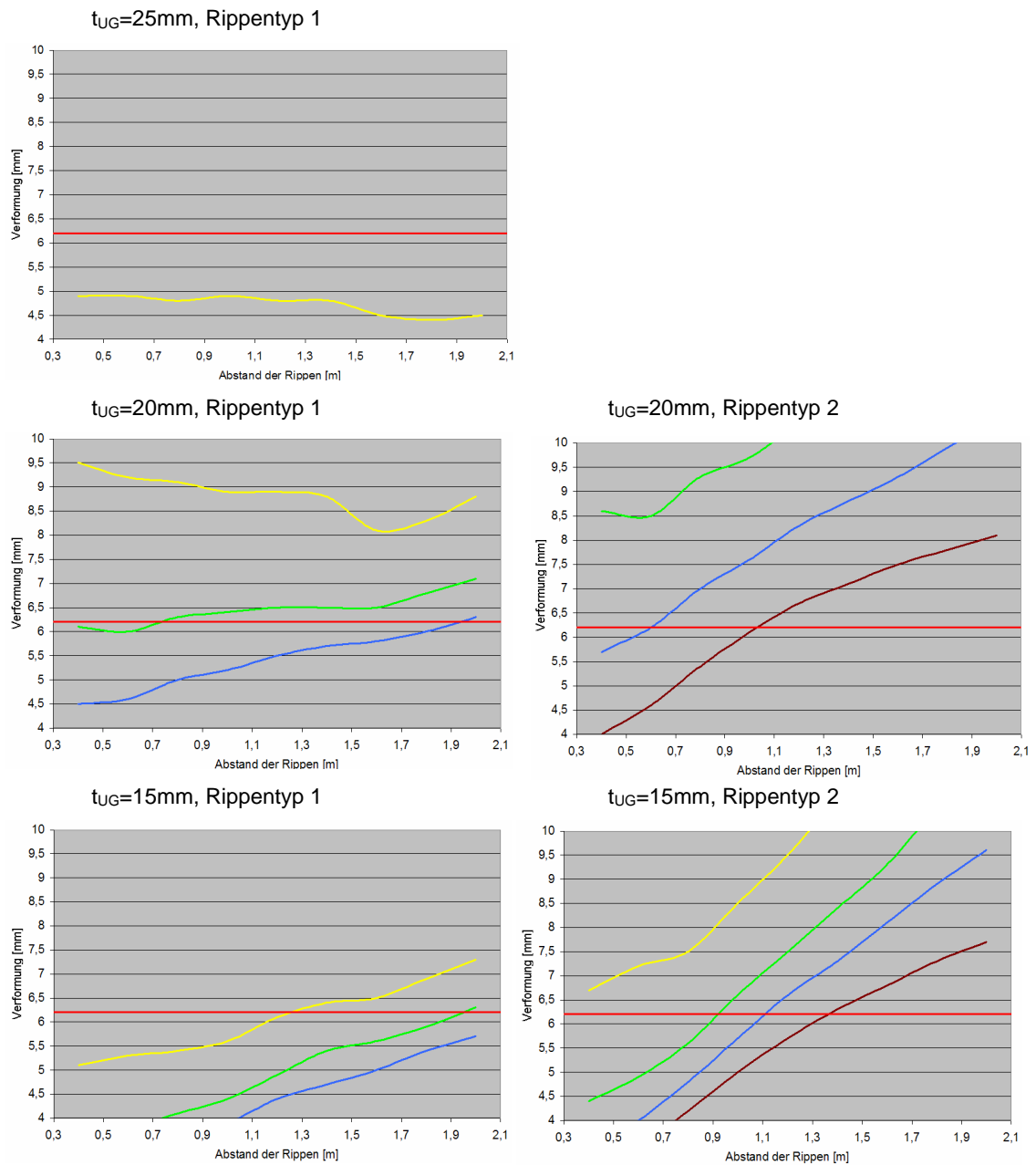


Diagramm 46: Verformung UG im Bereich $x=5m$ und $x=10m$ mit zusätzlichen Rippen

• Ergebniszusammenfassung

Aus Tabelle 47 und Tabelle 48 kann abgelesen werden, ob zusätzliche Aussteifungen erforderlich werden und wenn dies der Fall ist, welcher Rippentyp und welcher maximale Abstand zwischen zwei benachbarten Steifen vorzusehen ist.

		Stegdicke [mm]				
		22	15	12	10	8
Dicke UG [mm]	30	■	■	■	■	■
	25	■	■	■	■	■
	20	■	■	■	◇ 2,0	◇ 1,2
	15	■	◇ 1,0	x 1,2	x 1,2	x 1,0
Legende: ■ keine zusätzlichen Aussteifungen erforderlich ◇ Aussteifung 200x400x20, max. Abstand [m] x Aussteifung 200x600x20, max. Abstand [m]						

Tabelle 47: Zusätzliche Verformungssteifen für den Bereich $x=0m$ bis $x=5m$

		Stegdicke [mm]				
		22	15	12	10	8
Dicke UG [mm]	30	■	■	■	■	■
	25	■	■	■	■	◇ 2,0
	20	■	■	◇ 1,4	x 1,8	x 1,2
	15	■	◇ 1,0	x 1,0	x 0,8	x 0,4
Legende: ■ keine zusätzlichen Aussteifungen erforderlich ◇ Aussteifung 200x400x20, max. Abstand [m] x Aussteifung 200x600x20, max. Abstand [m]						

Tabelle 48: Zusätzliche Verformungssteifen für den Bereich $x=5m$ bis $x=10m$

Analytische Berechnung

Die Wahl eines geeigneten statischen Systems zur sinnvollen Erfassung der lokalen Verformung hat sich als sehr schwierig erwiesen. Einfache statische Systeme lieferten keine verwertbaren Ergebnisse. Daher ist ein komplexeres Stabwerksmodell zur analytischen Berechnung erforderlich (Abbildung 99). Um eine Fläche mit Stabelementen abbilden zu können, wurden nur die in der x-Achse und z-Achse liegenden Stäbe mit einer Fläche behaftet. Um diese einzelnen Flächen miteinander biegesteif zu koppeln, wurde allen in der y-Achse liegenden Stäben zwar kein Querschnitt, jedoch eine große Steifigkeiten zugeordnet. Die Abstände der Stäbe in y-Richtung betragen je 0,5m, im Bereich der Einwirkung wurden die Abstände auf 0,05m verkleinert (Abbildung 100), um die Last nicht in einem Punkt angreifen zu lassen.

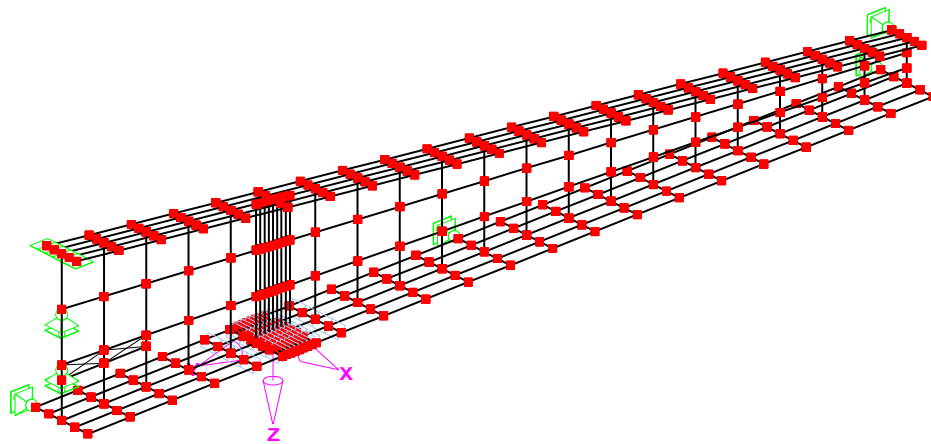


Abbildung 99: Stabwerksmodell zur Bestimmung der lokalen Verformung

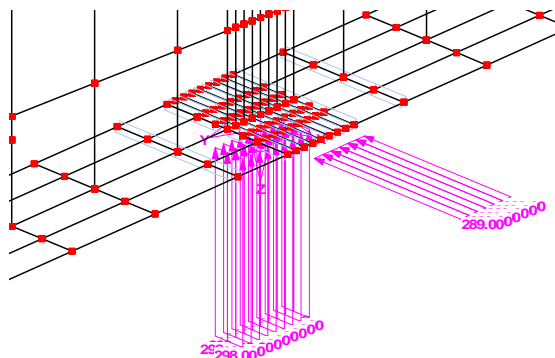


Abbildung 100: Ansatz der Einwirkungen an der Stelle x=7,5m

Als Einwirkungsgröße auf die 9 Einzelflächen, das die Versuchblagergröße abbilden soll, ergibt sich:

$$q_z = \frac{F}{n \cdot b} = \frac{429}{9 \cdot 0,16} = 298 \text{ kN/m}$$

$$q_x = \frac{F_{\text{Seitenführung}}}{l_{\text{Wälzlager}}} = \frac{86,75}{0,3} = 289 \text{ kN/m}$$

Die Einwirkung infolge Reibung kann vernachlässigt werden.

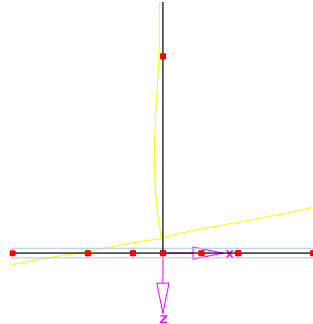


Abbildung 101: Lokale Verformung im Querschnitt mittels RStab [28]

		lokale Verformung am Untergurt [mm]			
		$t_{OG}=30\text{mm}$	$t_{OG}=25\text{mm}$	$t_{OG}=20\text{mm}$	$t_{OG}=15\text{mm}$
Stegdicke	22mm	0,2	0,2	0,3	0,4
	15mm	0,4	0,5	0,6	0,7
	12mm	0,9	0,9	1,0	1,1
	10mm	1,5	1,5	1,6	1,7
	8mm	2,9	3,0	3,0	3,2

Tabelle 49: Lokale Verformung im Untergurt nach analytischer Berechnung

Anhand von Tabelle 49 zeigt sich, dass die Verformungswerte deutlich geringer ausfallen, als die nach FEM-Berechnung. Grund dafür ist, dass zwar die Stegbiegung (Abbildung 101) mit diesem Modell näherungsweise erfasst wird, jedoch fällt die Flanschbiegung minimal aus und wird durch die Dicke des Untergurts kaum beeinflusst. Die genaue Gegenüberstellung der Ergebnisse erfolgt im Kapitel 9.3.

7 Anschlussstatik

In diesem Kapitel werden allgemeingültig für die Vorbauschnabelvarianten die Festlegung für den Anschlussbereich VBS – Brückenfußpunkt sowie die Nachweise der Schweißverbindungen erbracht. Als Einwirkung wird die ungünstigste Variante mit 5,5kN/m im Lastfall 2 (siehe Kapitel 5.1) für das Vorbauschnabeleigengewicht festgelegt, somit sind alle anderen Varianten mit geringerem Eigengewicht ebenfalls erfasst.

Um die Nachweise übersichtlicher zu gestalten, werden die Werte der Grenzspannungen im Grundwerkstoff sowie in den Schweißverbindungen nicht explizit erläutert. Diese sind dem Anhang B 1 zu entnehmen.

Stumpfnähte werden in diesem Zusammenhang nicht nachgewiesen, da diese stets voll anzuschließen sind und die Nahtgüte nachzuweisen ist. Somit ist keine Abminderung der Grenzschnahtspannung erforderlich und die Festigkeit der Naht kann der des Grundwerkstoffs gleichgesetzt werden.

• Nachweis der Schweißverbindung Steg – Flansch

Maßgebend für die Dimensionierung der Schweißverbindung ist der Querschnitt an der Schnabelspitze ($x=0\text{m}$), da hier die Schubspannung aufgrund der geringen Steghöhe ihren maximalen Wert erreicht. Als ungünstigste Abmessungskombination wird der Steg mit 8mm und der Obergurt mit 35mm gewählt.

gewählt: $a=5\text{mm}$ (Doppelkehlnaht)

$$2 \leq a \leq 0,7 \cdot \min t \rightarrow 2\text{mm} \leq a = 5\text{mm} \leq 0,7 \cdot 8 = 5,6\text{mm}$$

$$a \geq \sqrt{\max t} - 0,5 \rightarrow a = 5\text{mm} < (\sqrt{35} - 0,5 = 5,4\text{mm})$$

Da die Mindestschweißnahtdicke für das 35mm Gurtblech nicht erreicht ist, ist bei der genannten Abmessungskombination das Schweißen nur unter Vorzuwärmen zulässig, um so einem zu schnellen Wärmeabfluss und damit eine Versprödungs- und Kaltrissgefahr vorzubeugen. Auf das Vorwärmen kann jedoch verzichtet werden, wenn die Dicke des Gurts $\leq 30\text{mm}$ mit $a=5\text{mm}$ oder die Dicke des Stegblechs $\geq 10\text{mm}$ mit $a=6\text{mm}$ definiert wird.

Infolge Querkraft:

$$\tau_{\parallel} = \frac{\max Q \cdot S_{1-1}}{I_y \cdot 2a} = \frac{452 \cdot 3150}{142412 \cdot 2 \cdot 0,5} = 9,99 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Infolge konzentrierter Lasteinleitung: (Dicke Untergurt: 15mm)

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_z}{c + (2a + t)} = \frac{452}{42 + (2 \cdot 0,5 + 1,5)} = 10,15 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Vergleichsspannungsnachweis:

$$\sigma_{W,V} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2} = \sqrt{10,15^2 + 9,99^2} = 14,25 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\frac{\sigma_{W,V}}{\sigma_{W,R,d}} = \frac{14,25}{20,73} = 0,69 < 1,0$$

• Nachweis der Quersteifen

Zum Nachweis der Quersteifen werden 2 Stellen untersucht. Zum einen erfolgt der Nachweis mit der Rippe an der geringsten Profilhöhe und zum anderen mit der Rippe an der größten Profilhöhe.

Überprüfung der Schweißnahtdicke

gewählt: $a = 4mm$ (umlaufend)

$$2mm \leq a = 4mm \leq 0,7 \cdot \min t = 0,7 \cdot 12 = 8,4mm$$

$$a = 4 > \sqrt{\max t} - 0,5 = \sqrt{30} - 0,5 = 4,97mm$$

$$F = 439kN$$

$$F_1 = \frac{b_a}{b} \cdot F = \frac{21}{48} \cdot 439 = 192kN$$

$$F_2 = \frac{F_1 \cdot (b_a/2 + f)}{h_{Steg}} = \frac{192 \cdot (21/2 + 2)}{39} = 61,5kN$$

Spannung in der Rippe

$$\sigma_A = \frac{F_1}{t_a \cdot b_a} = \frac{192}{1,2 \cdot 21} = 4,57 \frac{kN}{cm^2} < \sigma_{R,d} = 21,82 \frac{kN}{cm^2}$$

Spannung in den Gurtnähten

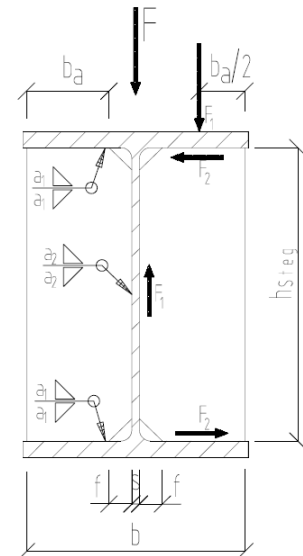
$$\sigma_{\perp} = \frac{F_1}{2 \cdot a_1 \cdot b_a} = \frac{192}{2 \cdot 0,4 \cdot 21} = 11,43 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_2}{2 \cdot a_1 \cdot b_a} = \frac{61,5}{2 \cdot 0,4 \cdot 21} = 3,66 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\sigma_{W,V} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2} = \sqrt{11,43^2 + 3,66^2} = 12 \frac{kN}{cm^2} < \sigma_{W,R,d} = 20,73 \frac{kN}{cm^2}$$

Spannung in der Stegnaht

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_1}{2 \cdot a_2 \cdot (h_{Steg} - 2f)} = \frac{192}{2 \cdot 0,4 \cdot (39 - 2 \cdot 2)} = 6,86 \frac{kN}{cm^2} < \sigma_{W,R,d} = 20,73 \frac{kN}{cm^2}$$



• Nachweis im Anschlussbereich Vorbauschnabel - Brückenfußpunkt

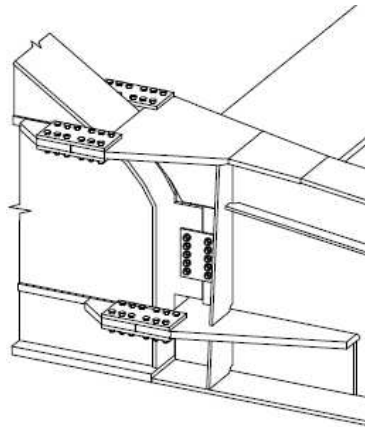


Abbildung 102: Anschluss Vorbauschnabel an Brückenfußpunkt

Nachweis der Zug-/Drucklasche

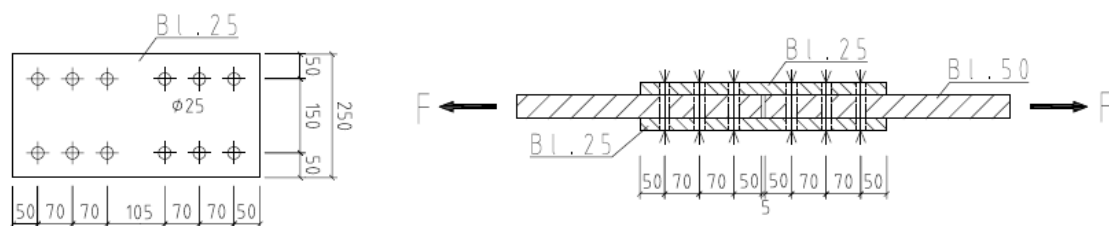


Abbildung 103: Zug-/Drucklasche

• **Einwirkungen**

$$N_{\text{Zug / Druck}} = \frac{M_y}{h} = \frac{4520}{1,185} = 3815 \text{ kN}$$

$$V_y = 90 \text{ kN}$$

• **Resultierende Bemessungslast:**

$$R = \sqrt{N_{\text{Zug / Druck}}^2 + V_y^2} = \sqrt{3815^2 + 90^2} = 3816 \text{ kN}$$

Die resultierende Bemessungslast geht je zur Hälfte über die beiden Stöße

• **Nachweis der Schraube auf Abscheren nach DIN 18800-1 (804):**

gew.: M24 – 10.9 – SLVP, Verbindung zweiseitig

$$V_{a,R,d} = 246 \text{ kN je Schraube}$$

$$\frac{R}{n \cdot m \cdot V_{a,R,d}} = \frac{3816 / 2}{6 \cdot 2 \cdot 246} = 0,65$$

- Nachweis GW unter Beachtung der Lochschwächung nach DIN 18800-1 (742)

$$A_{\text{Netto}} = A_{\text{Brutto}} - n \cdot t \cdot d_L = 5 \cdot 25 - 2 \cdot 2,5 \cdot 5 = 100 \text{ cm}^2$$

$$\sigma = \frac{Z}{A_{\text{Netto}}} = \frac{3816/2}{100} = 19,08 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq 19,54 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

- Überprüfung der Lochabstände nach DIN 18800-1 (805)

$$1,2 \cdot d_L \leq e_1 \leq 3,0 \cdot d_L = 30 \text{ mm} \leq 50 \text{ mm} \leq 75 \text{ mm} \quad \text{Randabst. in Kraftrichtung}$$

$$2,2 \cdot d_L \leq e \leq 6,0 \cdot d_L = 55 \text{ mm} \leq 70 \text{ mm} \leq 150 \text{ mm} \quad \text{Lochabst. in Kraftrichtung}$$

$$1,2 \cdot d_L \leq e_2 \leq 3,0 \cdot d_L = 30 \text{ mm} \leq 50 \text{ mm} \leq 75 \text{ mm} \quad \text{Randabst. } \perp \text{ zur Kraftrichtung}$$

$$2,4 \cdot d_L \leq e_3 \leq 6,0 \cdot d_L = 60 \text{ mm} \leq 150 \text{ mm} \leq 150 \text{ mm} \quad \text{Lochabst. } \perp \text{ zur Kraftrichtung}$$

- Grenzlochleibungskraft nach DIN 18800-1 (805)

Stelle 1:

$$\alpha_1 = 0,73 \cdot e_1 / d_L - 0,2 = 0,73 \cdot 50 / 25 - 0,2 = 1,26 \quad (\text{Randabstand})$$

$$\alpha_1 = 0,72 \cdot e / d_L - 0,51 = 0,72 \cdot 70 / 25 - 0,51 = 1,506 \quad (\text{Lochabstand})$$

$$V_{L,R,d} = t \cdot d_{\text{Sch}} \cdot \alpha_1 \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 2 \cdot 2,5 \cdot 2,5 \cdot 1,26 \cdot \frac{24}{1,1} = 344 \text{ kN} \quad \text{maßgebend}$$

$$V_{L,R,d} = t \cdot d_{\text{Sch}} \cdot \alpha_1 \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 5,0 \cdot 2,5 \cdot 1,506 \cdot \frac{21,5}{1,1} = 368 \text{ kN}$$

Stelle 2:

$$\alpha_1 = 0,72 \cdot e / d_L - 0,51 = 0,72 \cdot 70 / 25 - 0,51 = 1,506$$

$$V_{L,R,d} = t \cdot d_{\text{Sch}} \cdot \alpha_1 \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 2 \cdot 2,5 \cdot 2,5 \cdot 1,506 \cdot \frac{24}{1,1} = 410 \text{ kN}$$

$$V_{L,R,d} = t \cdot d_{\text{Sch}} \cdot \alpha_1 \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 5,0 \cdot 2,5 \cdot 1,506 \cdot \frac{21,5}{1,1} = 368 \text{ kN} \quad \text{maßgebend}$$

Stelle 3:

$$\alpha_1 = 0,73 \cdot e_1 / d_L - 0,2 = 0,73 \cdot 50 / 25 - 0,2 = 1,26$$

$$\alpha_1 = 0,72 \cdot e / d_L - 0,51 = 0,72 \cdot 70 / 25 - 0,51 = 1,506$$

$$V_{L,R,d} = t \cdot d_{\text{Sch}} \cdot \alpha_1 \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 2 \cdot 2,5 \cdot 2,5 \cdot 1,506 \cdot \frac{24}{1,1} = 410 \text{ kN}$$

$$V_{L,R,d} = t \cdot d_{\text{Sch}} \cdot \alpha_1 \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 5,0 \cdot 2,5 \cdot 1,26 \cdot \frac{21,5}{1,1} = 308 \text{ kN} \quad \text{maßgebend}$$

Nachweis:

$$\Sigma V_{L,R,d} = 2 \cdot 344 + 2 \cdot 368 + 2 \cdot 308 = 2040 \text{ kN}$$

$$\frac{R}{\Sigma V_{L,R,d}} = \frac{3816/2}{2040} = 0,93 \leq 1,0$$

Nachweis des Querkraftanschlusses

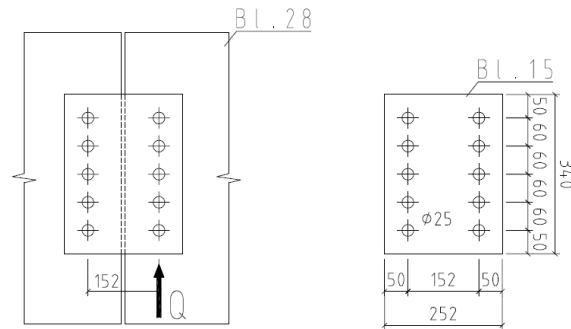


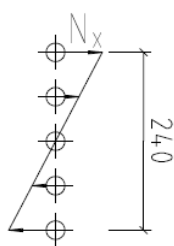
Abbildung 104: Querkraftanschluss

• Einwirkungen

$$V_z = 632 \text{ kN}$$

$$M = V_z \cdot e = 632 \cdot 0,152 = 94,8 \text{ kNm}$$

• Resultierende Bemessungslast



$$N_x = \frac{M}{h} \cdot f = \frac{94,8}{0,24} \cdot 0,8 = 316 \text{ kN}$$

für Wert f siehe [15] S.88 Tabelle 3.11 (einreihige Schraubverbindung mit 5 Schrauben)

$$R = \sqrt{316^2 + 632^2} = 706 \text{ kN}$$

• Nachweis GW Lasche im Bereich der Lochschwächung nach DIN 18800-1 (742)

$$A_{\text{Netto}} = A_{\text{Brutto}} - t \cdot d_L = 25 \cdot 15 - 2 \cdot 15 \cdot 2,5 = 30 \text{ cm}^2$$

$$\sigma = \frac{R}{n \cdot A_{\text{Netto}}} = \frac{706}{2 \cdot 30} = 11,77 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq 21,82 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

• Nachweis der Schraube auf Abscheren nach DIN 18800-1 (804):

gew.: M24 – 10.9 – SLVP, Verbindung zweischnittig

$$V_{a,R,d} = 246 \text{ kN je Schraube}$$

$$\frac{R}{n \cdot m \cdot V_{a,R,d}} = \frac{706}{5 \cdot 2 \cdot 246} = 0,30 \leq 1,0$$

• *Überprüfung der Lochabstände nach DIN 18800-1 (805)*

$$1,2 \cdot d_L \leq e_1 \leq 3,0 \cdot d_L = 30\text{mm} \leq 50\text{mm} \leq 75\text{mm} \quad \text{Randabst. in Kraftrichtung}$$

$$2,2 \cdot d_L \leq e \leq 6,0 \cdot d_L = 55\text{mm} \leq 60\text{mm} \leq 150\text{mm} \quad \text{Lochabst. in Kraftrichtung}$$

$$1,2 \cdot d_L \leq e_2 \leq 3,0 \cdot d_L = 30\text{mm} \leq 50\text{mm} \leq 75\text{mm} \quad \text{Randabst. } \perp \text{ zur Kraftrichtung}$$

$$2,4 \cdot d_L \leq e_3 \leq 6,0 \cdot d_L = 60\text{mm} \leq 150\text{mm} \leq 150\text{mm} \quad \text{Lochabst. } \perp \text{ zur Kraftrichtung}$$

• *Grenzlochleibungskraft nach DIN 18800-1 (805)*

als maßgebend wird die Lasche betrachtet

Stelle 1:

$$\alpha_1 = 0,73 \cdot e_1 / d_L - 0,2 = 0,73 \cdot 50 / 25 - 0,2 = 1,26 \quad (\text{Randabstand})$$

$$V_{L,R,d} = t \cdot d_{Sch} \cdot \alpha_1 \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 2 \cdot 1,5 \cdot 2,5 \cdot 1,26 \cdot \frac{24}{1,1} = 206,2\text{kN}$$

Stelle 2:

$$\alpha_1 = 0,72 \cdot e / d_L - 0,51 = 0,72 \cdot 70 / 25 - 0,51 = 1,506 \quad (\text{Lochabstand})$$

$$V_{L,R,d} = t \cdot d_{Sch} \cdot \alpha_1 \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 2 \cdot 1,5 \cdot 2,5 \cdot 1,506 \cdot \frac{24}{1,1} = 246,5\text{kN} \quad \text{maßgebend}$$

Nachweis:

$$\Sigma V_{L,R,d} = 1 \cdot 206,2 + 4 \cdot 246,5 = 1192,2\text{kN}$$

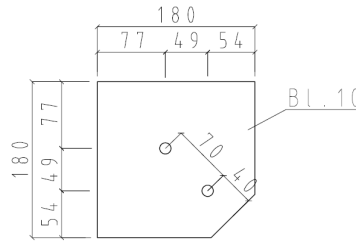
$$\frac{R}{\Sigma V_{L,R,d}} = \frac{706}{1192,2} = 0,59 \leq 1,0$$

Nachweis Schweißverbindung Zuglasche

Da die Nahtlängen sowie die Stegblechdicken bei jeder Variante unterschiedlich sind, wird die Nahtdicke mit $a=0,7 \cdot \text{min}$ ausgeführt (Kehlnaht, umlaufend). Somit ist die Nahtdicke stets größer als die des kleineren Bleches und gilt daher als voll angeschlossen. Auf einen Nachweis kann daher verzichtet werden. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die Zuglasche mit $t=50\text{mm}$ ausreichend vorgewärmt werden muss, um einem sicheren Wärmeeintrag zu gewährleisten und somit einem zu schnellen Abkühlen entgegenzuwirken.

Nachweis der Verbandsanschlüsse

Bauteil:	BL.10x180x180
Verbindung mit:	L 80x8
Verbindungsmittel:	M12 10.9
max N_{Druck} :	-82 kN
max N_{Zug} :	82 kN



• *Nachweis der Schweißnaht:*

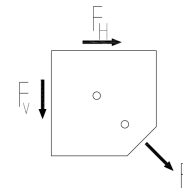
gewählt: $a=3\text{mm}$ (Kehlnaht, umlaufend)

$$2 \leq a = 3\text{mm} \leq 0,7 \cdot \min t = 0,7 \cdot 10 = 7\text{mm};$$

$a = 3\text{mm} < \sqrt{\max t} - 0,5 = \sqrt{20} - 0,5 = 3,9$ durch entsprechendes Vorwärmen wird einem zu schnellen Wärmeabfluss ($t_{8/5}$) entgegengewirkt.

$$F_H = F_V = F \cdot \cos 45 = 60,1\text{kN}$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{F}{A_W} = \frac{82}{2 \cdot 0,3 \cdot 18} = 7,59 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} < \sigma_{W,R,d} = 20,73 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

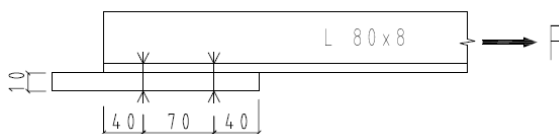


• *Nachweis Verbindungsmittel:*

$$V_{a,R,d} = 56,6\text{kN} \text{ je Scherfuge}$$

$$\frac{N}{n \cdot V_{a,R,d}} = \frac{82}{2 \cdot 56,5} = 0,72 < 1,0$$

• *Nachweis auf Lochleibung:*



$$1,2 \cdot d_L \leq e_1 \leq 3,0 \cdot d_L = 15,6\text{mm} \leq 40\text{mm} \leq 40\text{mm} \quad \text{Randabst. in Kraftrichtung}$$

$$2,2 \cdot d_L \leq e \leq 6,0 \cdot d_L = 28,6\text{mm} \leq 70\text{mm} \leq 78\text{mm} \quad \text{Lochabst. in Kraftrichtung}$$

$$1,2 \cdot d_L \leq e_2 \leq 6,0 \cdot d_L = 15,6\text{mm} \leq 40\text{mm} \leq 78\text{mm} \quad \text{Randabst. } \perp \text{ zur Kraftrichtung}$$

maßgebend für die Lochleibung ist das Winkelprofil

$$\alpha_1 = 1,1 \cdot e_1 / d_L - 0,3 = 1,1 \cdot 40 / 13 - 0,3 = 3,08$$

$$V_{L,R,d} = t \cdot d_{Sch} \cdot \alpha_1 \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot 12 \cdot 3,08 \cdot \frac{24}{1,1} = 64,51\text{kN}$$

$$\alpha_1 = 1,08 \cdot e / d_L - 0,77 = 1,08 \cdot 70 / 13 - 0,77 = 5,04$$

$$V_{L,R,d} = t \cdot d_{Sch} \cdot \alpha_1 \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot 12 \cdot 5,04 \cdot \frac{24}{1,1} = 105,6 \text{ kN}$$

$$\Sigma V_{L,R,d} = 64,51 + 105,6 = 170,1$$

$$\frac{R}{\Sigma V_{L,R,d}} = \frac{82}{170,1} = 0,48 \leq 1,0$$

8 Kalkulation

8.1 Kalkulation Bauteilgewicht und Materialkosten

Die Kalkulation des Bauteilgewichts und damit der Materialkosten erfolgt auf Basis der Zeichnung 1 bis Zeichnung 4 im Anhang D. Die Materialkosten werden jedoch nicht anhand des Konstruktionseigengewichts ermittelt, sondern anhand der Blechtafelgrößen, die erforderlich sind, um die jeweiligen Konturen ausbrennen zu können. Die Zuschnittpläne sind der Zeichnung 3 und Zeichnung 4 zu entnehmen. Zunächst wird jedoch darauf eingegangen, wie sich der Materialpreis zusammensetzt.

Zuschläge auf den Grundpreis des Stahls je Tonne:

- Grund-, Qualitäts- und Sonderstähle (z.B. S235 J2+N)
- Abmessungsaufpreise (Dicke, Länge, Ebenheit)
- Mindermengenzuschläge
- Brucheinschnürung senkrecht zur Erzeugnisoberfläche
- Aufpreise für besondere Vorschriften (CEV, Begrenzung von Begleitelementen)
- Besondere Proben (Zugversuch, Faltversuch, Aufschweißbiegeversuch ect.)
- Stahlentzunderung und Farbschützen
- Verpackung / Versand

Die Ermittlung des Materialpreises erfolgt nach der aktuellen Nettopreisliste [39] für Grobbleche der Firma Ilsenburger Grobbleche GmbH. Die Festlegungen über Güte- und Prüfanforderungen der Bleche wurden den technischen Lieferbedingungen für den Eisenbahnbrückenbau – der DBS 918 002-02 [11] – entnommen. Folgende Forderungen werden dabei an das Material gestellt, die hinsichtlich der Bestellung berücksichtigt werden müssen. Für Bleche $\geq 10\text{mm}$ ist eine Ultraschallprüfung der Flächen (FLP) in der Qualitätsklasse S1 nach DIN EN 10160 sowie für Randzonen (RZP) in der Qualitätsklasse E1 zu gewährleisten. Allgemein wird als Lieferzustand für alle Materialsorten +N gefordert. Für die Materialsorte S355 für Dicken $> 30\text{mm}$ ist ein Feinkornbaustahl der Güte N oder M zu verwenden. Da als Grenzmaterialdicke bei den Varianten in S355 maximal 30mm untersucht wurden, ist diese Forderung nicht zu berücksichtigen. Für S355 $\geq 16\text{mm}$ ist der Nachweis der Kerbschlageigenschaften walzblechweise zu erbringen.

Für die chemische Zusammensetzung ist die Schmelzanalyse in der Prüfbescheinigung anzugeben. Dies wird ebenfalls bei der Bestellung als gesonderter Kostenpunkt aufgelistet. Hinsichtlich der mitgelieferten Dokumente sowie des Konformitätsnachweises ist in den Abnahmeprüfbescheinigungen der DBS 918002-02 als Norm ausdrücklich mit aufzuführen.

Weiterhin ist der Konformitätsnachweis gemäß Bauregelliste (CE-Kennzeichnung) erforderlich.

Materialkostenzusammenstellung

Grundpreis: 450,00 €/t

Aufpreise:

- S 235 J2+N	+ 34,00 €/t	
- S 355 J2+N	+ 59,00 €/t	
- Abmessungsaufpreis Breite:	+ 43,00 €/t	bis 1550mm
- Abmessungsaufpreis Länge:	+ 3,00 €/t	bis 12000mm
- Abnahmeprüfzeugnis 3.2:	+ 4,00 €/t	
- Ultraschallprüfung:	+ 18,00 €/t	für Prüfmart FLP+RZP in Klasse E1/S1
- Kerbschlagbiegeversuch	+ 4,00 €/t	gilt nur für S355
- Entzundern + Primer	+ 36,00 €/t	
- chemische Zusammensetzung	+ 2,00 €/t	losweise
- CE-Kennzeichnung	+ 2,00 €/t	
- LKW-Versand	+ 2,00 €/t	

Summe:

S 235	594,00 €/t Nettopreis; 706,86 €/t inkl. MwSt.
S 355	623,00 €/t Nettopreis; 741,37 €/t inkl. MwSt.

Da der Vorbauschubel nach dem Verschiebung der beiden Eisenbahnüberführungen komplett verschrottet wird, kann von vorn herein der Stahlschrottpreis vom Materialeinkaufspreis abgezogen werden. Der Stahlschrottpreis für schweren Mischeschrott lag im 4.Quartal 2009 bei aktuell 120,00€/t (nach Angabe von TSR Recycling GmbH & Co. KG Hannover). Somit ergeben sich als anzusetzende Materialkosten:

S 235	586,86 €/t
S 355	621,37 €/t

Die verwendeten Winkelprofile bei den Verbänden werden stets in S235 JR +AR zu einem Preis von 700,00 €/t (inkl. MwSt.) angesetzt.

Die Aufstellung des Konstruktionseigengewichts kann im Folgenden der Tabelle 50 bis Tabelle 54 entnommen werden.

Aufstellung Konstruktionseigengewicht (nach Zeichnung 2)

Pos.	Bauteil	Bezeichnung	Gewicht je Stück [kg]	Kommentar
1	Untergurt	Bl. 30x700x10000	1651,7	
		Bl. 25x700x10000	1376,4	
		Bl. 20x700x10000	1101,1	
		Bl. 15x700x10000	825,8	
2	Obergurt	Bl. 35x400x9079	999,7	bezogen auf 500mm Aufdickungs- länge
		Bl. 30x400x9079	856,9	
		Bl. 25x400x9079	714,1	
		Bl. 20x400x9079	571,3	
		Bl. 15x400x9079	428,5	
	-	Bl. 35x400x250	27,5	Zur rechnerischen Gewichts- ermittlung für verschiedene Aufdi- ckungslängen je 250mm
		Bl. 30x400x250	23,6	
		Bl. 25x400x250	19,7	
		Bl. 20x400x250	15,7	
		Bl. 15x400x250	11,8	
3	Steg	Bl. 22x1570x10313	1806,6	ohne Aufdickung im Steg
		Bl. 15x1570x10313	1232,0	ohne Aufdickung im Steg
		Bl. 15x1570x10313	1163,0	Lasteinleitungslänge 1100mm
		Bl. 12x1570x10313	930,5	
		Bl. 10x1570x10313	775,4	
		Bl. 8x1570x10313	620,3	
	-	Bl. 15x385x100	5,1	Zur rechnerischen Gewichts- ermittlung für verschiedene Lastein- leitungslängen je 100mm
		Bl. 12x385x100	4,1	
		Bl. 10x385x100	3,4	
		Bl. 8x385x100	2,7	
4	Zuglasche	Bl. 50x840x1000	246,4	Lasteinleitungslänge 600mm
		Bl. 50x940x1000	272,0	Lasteinleitungslänge 700mm
		Bl. 50x1040x1000	297,5	Lasteinleitungslänge 800mm
		Bl. 50x1140x1000	323,1	Lasteinleitungslänge 900mm
		Bl. 50x1240x1000	348,7	Lasteinleitungslänge 1000mm
		Bl. 50x1340x1000	374,2	Lasteinleitungslänge 1100mm
		Bl. 50x1440x1000	399,8	Lasteinleitungslänge 1200mm
		Bl. 50x1540x1000	425,3	Lasteinleitungslänge 1300mm
		Bl. 50x1640x1000	450,9	Lasteinleitungslänge 1400mm
		Bl. 50x1840x1000	502,0	Lasteinleitungslänge 1600mm

Tabelle 50: Konstruktionseigengewicht der einzelnen Baugruppen

Pos.	Bauteil	Bezeichnung	Gewicht je Stück [kg]	Kommentar
5	Drucklasche	Bl. 50x1004x1000	319,7	
6	Stegblech- aufdickung	Bl. 22x385x1300	86,6	bezogen auf 1100mm Lastein- leitungslänge
		Bl. 15x385x1300	59,0	
	-	Bl. 22x385x100	6,7	Zur rechnerischen Gewichts- ermittlung für verschiedene Lastein- leitungslängen je 100mm
		Bl. 15x385x100	4,5	
7	Steife	Bl. 20x1023x330	40,8	Steife bei x=5,0m
8	Steife	Bl. 20x396x330	15,6	Steife bei x=0m
9	Steife	Bl. 20x385x330	18,6	Steife bei x=9,6m
10	Steife	Bl. 20x289x1135	41,7	Steife bei x=9,6m
11	Steife	Bl. 20x229x1135	36,3	Steife bei x=9,6m
12	Stegverstär- kung	Bl. 28x695x100	15,3	
13	Aufdickung Obergurt	Bl. 35x500x250	31,0	Aufdickungslänge 250mm
		Bl. 35x500x500	61,9	Aufdickungslänge 500mm
		Bl. 35x500x750	92,9	Aufdickungslänge 750mm
		Bl. 35x500x1000	123,9	Aufdickungslänge 1000mm
		Bl. 35x500x1700	210,6	Aufdickungslänge 1700mm
		Bl. 20x500x1250	88,5	Aufdickungslänge 1250mm
14	Quersteife	Bl. 20x330x1288	51,6	Steife bei x=7,1m
15	Quersteife	Bl. 20x330x832	33,3	Steife bei x=3,5m
16	Längssteife	Bl. 20x100x2502	39,4	1. zusätzliche Längssteife
17	Längssteife	Bl. 20x100x2099	33,0	2. zusätzliche Längssteife
18	Längssteife	Bl. 20x100x1512	23,7	3. zusätzliche Längssteife
19	Steife	Bl. 20x200x400	9,3	Verformungssteife Typ1
20	Steife	Bl. 20x200x600	13,9	Verformungssteife Typ 2
21	Lasche	Bl. 10x180x180	2,4	Anschlusslasche Verbände
22	Blech	Bl. 50x250x242	19,3	
23	Verband	L 70x7x2848	21,0	
24	Verband	L 70x7x6319	46,6	
25	Verband	L 80x8x7818	75,5	
26	Verband	L 80x8x8030	77,6	
27	Verband	L 130x12x6110	144,2	
Anschlussbleche (Verbindung VBS mit Brückenfußpunkt)				
28	Anschluss	Bl. 25x485x250	25,7	
29	Anschluss	Bl. 15x340x252	11,2	
30	Anschluss	Bl. 50x446x250	48,7	

Tabelle 51: Konstruktionseigengewicht der einzelnen Baugruppen - Fortsetzung

Aufstellung Tafelgewichte (nach Zeichnung 3 und Zeichnung 4)

Tafel Nr.	Abmessung [mm]	Tafeldicke [mm]	Gewicht je Tafel [kg]	Kommentar
1	10040x1460	30	3458,6	
		25	2882,2	
		20	2305,8	
		15	1729,3	
2	9119x860	35	2158,9	bezogen auf 500mm Aufdickungslänge
		30	1850,5	
		25	1542,0	
		20	1233,6	
		15	925,2	
	250x860	35	55,0	Zur rechnerischen Gewichts- ermittlung für verschiedene Aufdi- ckungslängen je 250mm
		30	47,2	
		25	39,4	
		20	31,4	
		15	23,6	
3	10555x2716	22	3973,8	
		15	2709,4	
		12	2167,5	
		10	1806,3	
		8	1445,0	
4	1044x1885	50	774,1	
5	1040x1741	50	712,0	Lasteinleitungslänge 600
6	1040x1938	50	792,5	Lasteinleitungslänge 700
7	1040x2135	50	873,3	Lasteinleitungslänge 800
8	1179x1986	50	921,0	Lasteinleitungslänge 900
9	1219x1952	50	981,8	Lasteinleitungslänge 1000
10	1379x1924	50	1043,2	Lasteinleitungslänge 1100
11	1479x1910	50	1105,7	Lasteinleitungslänge 1200
12	1579x1169,2	50	1169,2	Lasteinleitungslänge 1300
13	1679x1867	50	1232,9	Lasteinleitungslänge 1400
14	1840x1879	50	1359,6	Lasteinleitungslänge 1600
15	800x1320	22	182,7	bezogen auf 1100mm Lasteinlei- tungslänge
	800x1320	15	124,6	
	800x100	22	13,4	zur rechnerischen Bestimmung je 100mm Lasteinleitungslänge
	800x100	15	9,0	

Tabelle 52: Aufstellung der Blechtafelgewichte

Tafel Nr.	Abmessung [mm]	Tafeldicke [mm]	Gewicht je Tafel [kg]	Kommentar
16	520x530	35	75,9	Aufdickungslänge 250mm
17	520x1030	35	147,4	Aufdickungslänge 500mm
18	980x770	35	207,7	Aufdickungslänge 750mm
19	980x1020	35	275,2	Aufdickungslänge 1000mm
20	980x1720	35	464,0	Aufdickungslänge 1700mm
21	980x1270	20	195,8	Aufdickungslänge 1250mm
22	1529x2206	20	512,2	
23	390x770	10	23,6	
24	1110x1330	20	232,2	
25	853x1070	20	143,6	
26	230x2522	20	91,3	
27	230x2119	20	76,7	
28	230x1532	20	55,4	
29	326x420	20	21,6	
30	426x620	20	41,6	
Anschlussbleche (werden in der Kalkulation getrennt betrachtet)				
31	1990x1050	25	410,8	
32	710x534	15	44,7	
33	1377x540	50	292,5	

Tabelle 53: Aufstellung der Blechtafelgewichte - Fortsetzung

• Aufstellung Profilgewichte

Die Längen sind bezogen auf die Lieferlängen von 6m und 12m.

Profil	Länge [mm]	Anzahl	Gewicht [kg]	Σ Gewicht [kg]
L 70x7	6000	1	44,28	44,28
L 70x7	12000	1	88,56	88,56
L 80x8	12000	4	115,6	462,4
L 130x12	12000	3	283,2	849,6

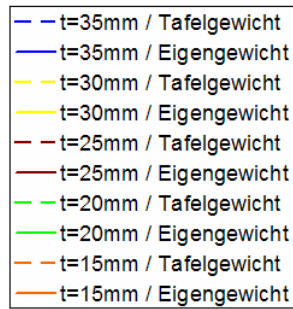
Tabelle 54: Aufstellung der Profilgewichte

Ergebnisse Gewichtsermittlung und Materialkostenkalkulation

Im Folgenden werden anhand des Diagramm 47 bis Diagramm 55 das Bauteilgewicht und die resultierenden Materialkosten für jede Variante dargestellt. Die Kalkulation kann im Einzelnen dem Anhang D entnommen werden.

Legende:

Dicke Obergurt



Dicke Obergurt

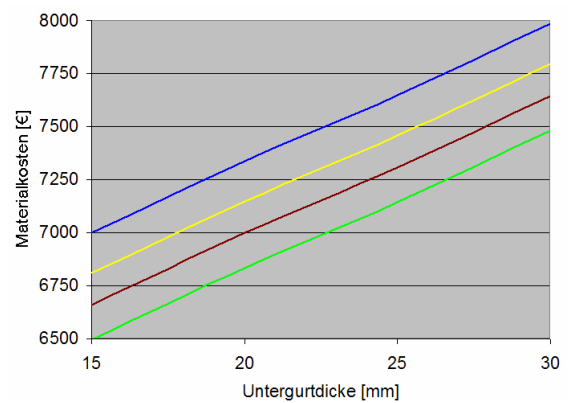
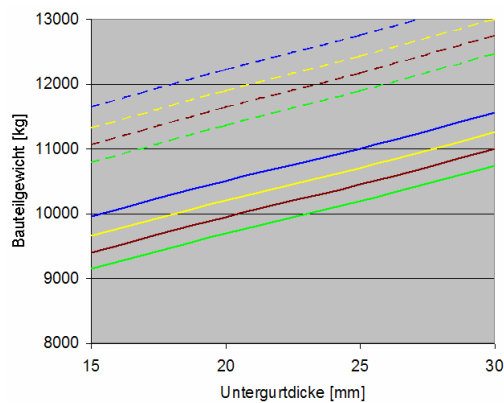
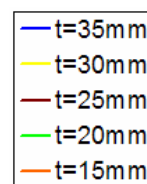


Diagramm 47: Bauteilgewicht und Materialkosten für s=22mm in S235

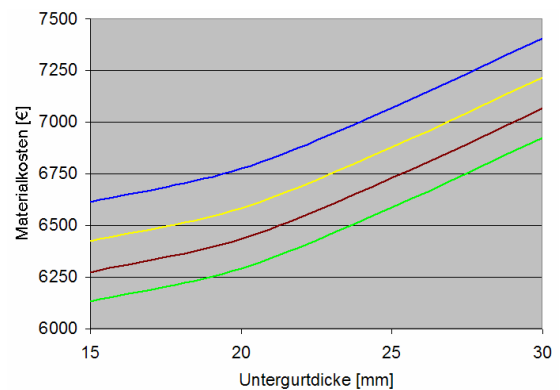
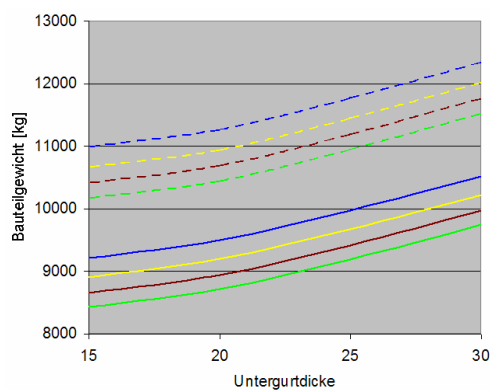


Diagramm 48: Bauteilgewicht und Materialkosten für s=15mm in S235

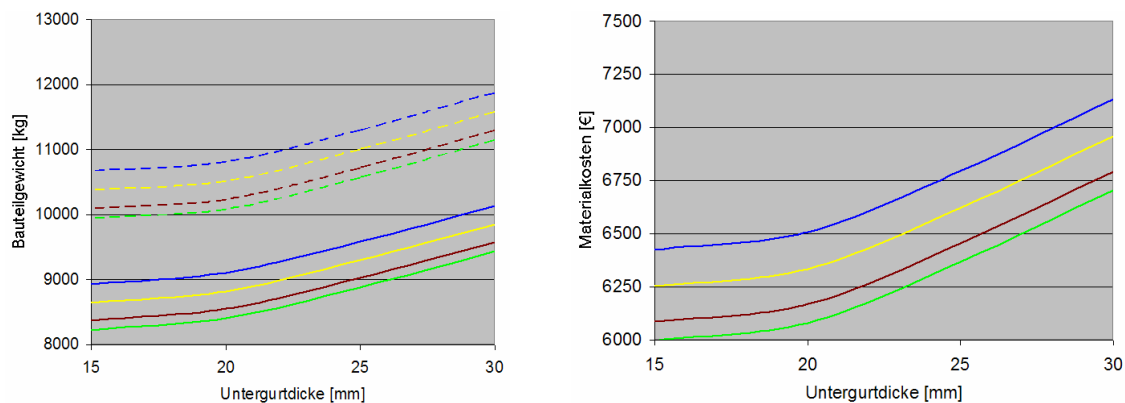


Diagramm 49: Bauteilgewicht und Materialkosten für $s=12\text{mm}$ in S235

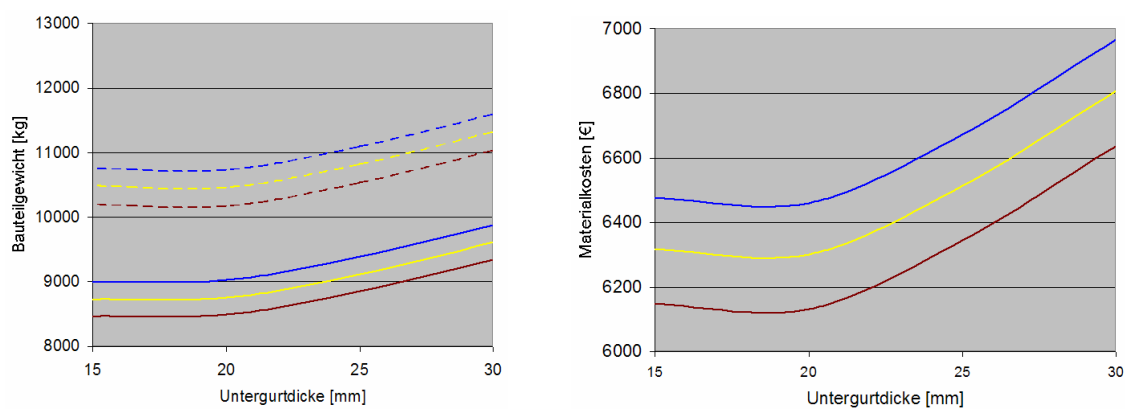


Diagramm 50: Bauteilgewicht und Materialkosten für $s=10\text{mm}$ in S235

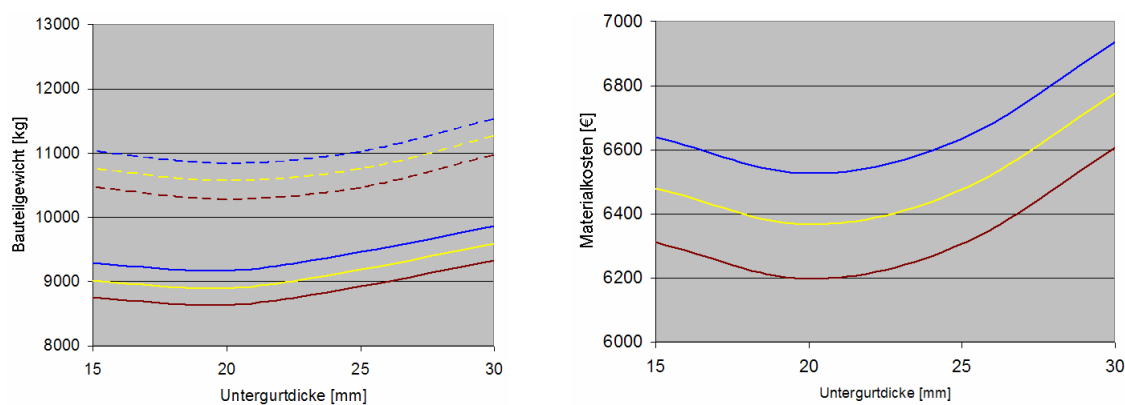


Diagramm 51: Bauteilgewicht und Materialkosten für $s=8\text{mm}$ in S235

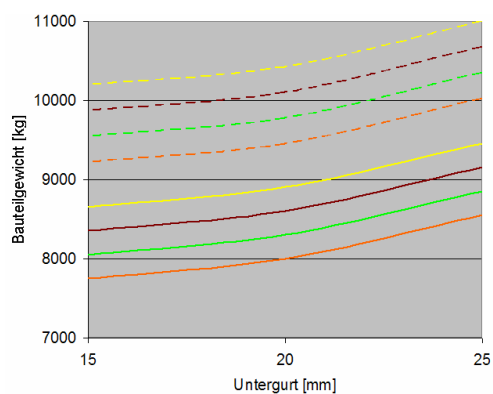


Diagramm 52: Bauteilgewicht und Materialkosten für $s=15\text{mm}$ in S355

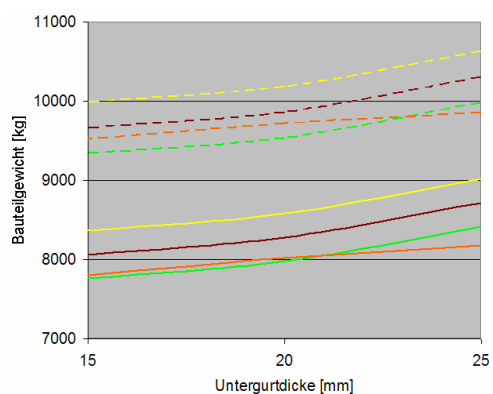


Diagramm 53: Bauteilgewicht und Materialkosten für $s=12\text{mm}$ in S355

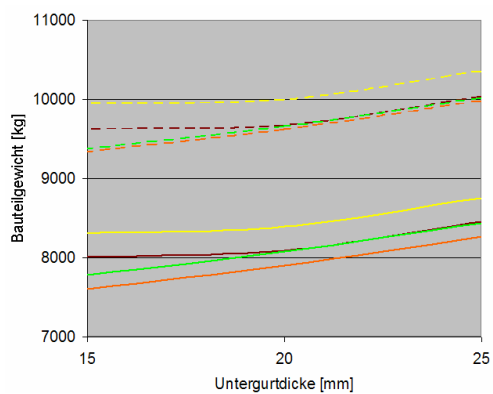


Diagramm 54: Bauteilgewicht und Materialkosten für $s=10\text{mm}$ in S355

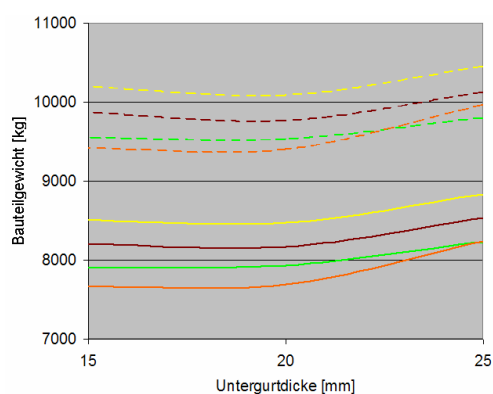


Diagramm 55: Bauteilgewicht und Materialkosten für $s=8\text{mm}$ in S355

8.2 Ermittlung der Fertigungskosten

Grundsätzliches Maß für die Ermittlung der Fertigungskosten ist die Fertigungszeit. Diese ergibt sich aus der Zeit für Zusammenbau, Heften, Schweißen, Nacharbeiten (Entfernen von Schweißspritzern etc. sowie ggf. Richtarbeiten). Diese einzelnen Zeiten werden getrennt für die auszuführenden Bearbeitungsschritte durchgeführt. Dabei sind nicht alle Bearbeitungsschritte für die verschiedenen Varianten auszuführen, abhängig davon, welche konstruktiven Maßnahmen erforderlich sind. In Abbildung 105 sind die Bearbeitungsschritte dargestellt. Die Fertigungskosten werden mit 44€/h angesetzt.

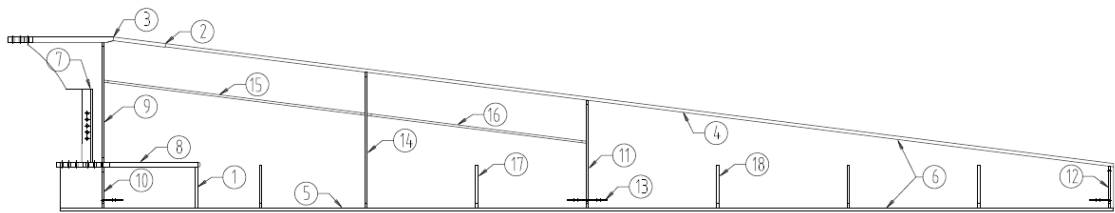
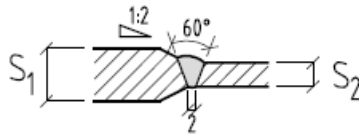


Abbildung 105: Definition der Bearbeitungsschritte

Verwendete Ausführungsarten der Schweißverbindungen:

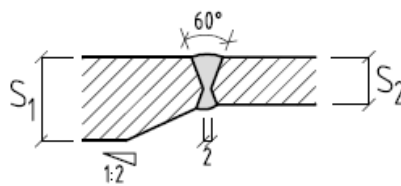
• V-Naht:



$$V_{Naht} = \left(s_2 \cdot b + s_2^2 \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \right) \cdot I_{Naht}$$

$$b = 2mm; \alpha = 60^\circ$$

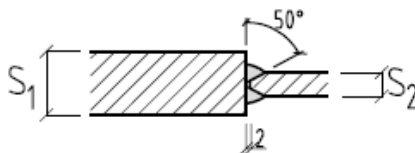
• 2/3 X-Naht:



$$V_{Naht} = \left(s_2 \cdot b + \frac{2}{3} s_2 \cdot \tan \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{3} s_2 \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \right) \cdot I_{Naht}$$

$$b = 2mm; \alpha = 60^\circ$$

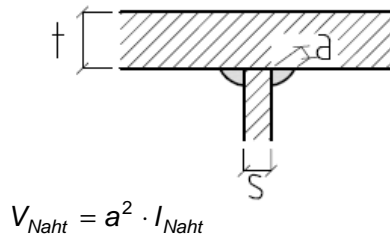
• DHY-Naht:



$$V_{Naht} = \left(s_2 \cdot b + \frac{s_2^2}{2} \cdot \tan \left(\frac{90 - \alpha}{2} \right) \right) \cdot I_{Naht}$$

$$b = 2mm; \alpha = 50^\circ$$

• **Kehlnaht:**



Kalkulation der einzelnen Bearbeitungsschritte:

• *Bearbeitungsschritt 1: Stegverstärkung an Stegblech heften / schweißen*

- Zusammenbau und heften: je Bauteil 5min

- Schweißen:

Nahtart: DHY-Naht

Verfahren: MAG (135) mit 50cm³/h

Nahtlänge: je 385mm

Nahtvolumen: s₂=15mm → V_{Naht}= 19,4cm³ je Bauteil

s₂=12mm → V_{Naht}= 14,3cm³ je Bauteil

s₂=10mm → V_{Naht}= 11,2cm³ je Bauteil

s₂=8mm → V_{Naht}= 8,4cm³ je Bauteil

• *Bearbeitungsschritt 2: Obergurtverstärkung an Obergurt heften / schweißen*

- Zusammenbau und heften: je Bauteil 5min

- Schweißen:

Nahtart: V-Naht (t<20mm); 2/3 X-Naht (t≥20mm)

Verfahren: MAG (135) mit 50cm³/h

Nahtlänge: je 400mm

Nahtvolumen: s₂=30mm → V_{Naht}= 139,5cm³ je Bauteil

s₂=25mm → V_{Naht}= 100,2cm³ je Bauteil

s₂=20mm → V_{Naht}= 67,3cm³ je Bauteil

s₂=15mm → V_{Naht}= 64,0cm³ je Bauteil

• *Bearbeitungsschritt 3: Drucklasche an Obergurt heften / schweißen*

- Zusammenbau und heften: je Bauteil 5min

- Schweißen:

Nahtart: 2/3 X-Naht

Verfahren: MAG (135) mit 50cm³/h

Nahtlänge: je 400mm (ohne Aufdickung)
je 500mm (mit Aufdickung)

Nahtvolumen: $s_2=35\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}= 185,2\text{cm}^3$ für $l_{\text{Naht}}=400\text{mm}$ je Bauteil

$s_2=30\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}= 139,5\text{cm}^3$ für $l_{\text{Naht}}=400\text{mm}$ je Bauteil

$s_2=25\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}= 100,2\text{cm}^3$ für $l_{\text{Naht}}=400\text{mm}$ je Bauteil

$s_2=20\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}= 67,3\text{cm}^3$ für $l_{\text{Naht}}=400\text{mm}$ je Bauteil

$s_2=15\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}= 40,9\text{cm}^3$ für $l_{\text{Naht}}=400\text{mm}$ je Bauteil

$s_2=35\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}= 231,5\text{cm}^3$ für $l_{\text{Naht}}=500\text{mm}$ je Bauteil

$s_2=30\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}= 174,3\text{cm}^3$ für $l_{\text{Naht}}=500\text{mm}$ je Bauteil

$s_2=25\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}= 125,2\text{cm}^3$ für $l_{\text{Naht}}=500\text{mm}$ je Bauteil

$s_2=20\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}= 84,2\text{cm}^3$ für $l_{\text{Naht}}=500\text{mm}$ je Bauteil

• *Bearbeitungsschritt 4: Obergurt an Steg heften*

- Zusammenbau und heften: je Bauteil 3h

• *Bearbeitungsschritt 5: Untergurt an Steg heften*

- Zusammenbau und heften: je Bauteil 3h

• *Bearbeitungsschritt 6: Untergurt und Obergurt auf Portal schweißen*

- Schweißen:

Nahtart: Doppelkehlnaht

Verfahren: MAG (135) auf Portal mit 200cm³/h

Nahtlänge: je 20650mm (Obergurt)
je 20000mm (Untergurt)

Nahtvolumen: $a=5\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}= 516,3\text{cm}^3$ (Obergurt) je Bauteil

$a=5\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}= 500,0\text{cm}^3$ (Untergurt) je Bauteil

• *Bearbeitungsschritt 7: Stegverstärkung heften / schweißen*

- Zusammenbau und heften: je Bauteil 5min

- Schweißen:

Nahtart: DHY-Naht

Verfahren: MAG (135) mit 50cm³/h

Nahtlänge: je 795mm

Nahtvolumen: $V_{\text{Naht}}= 17,3\text{cm}^3$ für alle Stegdicken, je Bauteil

• *Bearbeitungsschritt 8: Zuglasche heften / schweißen*

- Zusammenbau und heften: je Bauteil 20min

- Schweißen:

Nahtart: Doppelkehlnaht

Verfahren: MAG (135) auf Portal mit 200cm³/h

Nahtlänge: abhängig von Lasteinleitungslänge

Nahtvolumen: Die Nahtdicke wird mit $a=0,7 \cdot \min t$ festgelegt, Beachten, dass zwei verschiedene Nahtdicken geschweißt werden (Stegblech / Aufdickungsblech)

$s=22\text{mm}$ ($a=15\text{mm}$) $\rightarrow V_{\text{Naht}}=22,5\text{cm}^3$ je 100mm Nahtlänge

$s=15\text{mm}$ ($a=10\text{mm}$) $\rightarrow V_{\text{Naht}}=10\text{cm}^3$ je 100mm Nahtlänge

$s=12\text{mm}$ ($a=8\text{mm}$) $\rightarrow V_{\text{Naht}}=6,4\text{cm}^3$ je 100mm Nahtlänge

$s=10\text{mm}$ ($a=7\text{mm}$) $\rightarrow V_{\text{Naht}}=4,9\text{cm}^3$ je 100mm Nahtlänge

$s=8\text{mm}$ ($a=5\text{mm}$) $\rightarrow V_{\text{Naht}}=2,5\text{cm}^3$ je 100mm Nahtlänge

• *Bearbeitungsschritt 9: obere Quersteife bei $x=9,6\text{m}$ heften / schweißen*

- Zusammenbau und heften: je Bauteil 10min

- Schweißen:

Nahtart: Doppelkehlnaht

Verfahren: MAG (135) mit 50cm³/h

Nahtlänge: je 2890mm

Nahtvolumen: $a=4\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}=46,24\text{cm}^3$ je Bauteil

• *Bearbeitungsschritt 10: untere Quersteife bei $x=9,6\text{m}$ heften / schweißen*

- Zusammenbau und heften: je Bauteil 10min

- Schweißen:

Nahtart: Doppelkehlnaht

Verfahren: MAG (135) mit 50cm³/h

Nahtlänge: je 1696mm

Nahtvolumen: $a=4\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}=27,14\text{cm}^3$ je Bauteil

• *Bearbeitungsschritt 11: Quersteife bei $x=5,0\text{m}$ heften / schweißen*

- Zusammenbau und heften: je Bauteil 10min

- Schweißen:

Nahtart: Doppelkehlnaht

Verfahren: MAG (135) mit 50cm³/h

Nahtlänge: je 2746mm

Nahtvolumen: $a=4\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}=43,94\text{cm}^3$ je Bauteil

• *Bearbeitungsschritt 12: Quersteife bei $x=0m$ heften / schweißen*

- Zusammenbau und heften: je Bauteil 10min

- Schweißen:

Nahtart: Doppelkehlnaht

Verfahren: MAG (135) mit $50\text{cm}^3/\text{h}$

Nahtlänge: je 1492mm

Nahtvolumen: $a=4\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}= 23,87\text{cm}^3$ je Bauteil

• *Bearbeitungsschritt 13: Anschlüsse Verbände heften / schweißen*

- Zusammenbau und heften: je Bauteil 3min

- Schweißen:

Nahtart: Doppelkehlnaht

Verfahren: MAG (135) mit $50\text{cm}^3/\text{h}$

Nahtlänge: je 560mm

Nahtvolumen: $a=3\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}= 5,04\text{cm}^3$ je Bauteil

• *Bearbeitungsschritt 14: Quersteife $x=7,1m$ heften / schweißen*

- Zusammenbau und heften: je Bauteil 10min

- Schweißen:

Nahtart: Doppelkehlnaht

Verfahren: MAG (135) mit $50\text{cm}^3/\text{h}$

Nahtlänge: je 3276mm

Nahtvolumen: $a=4\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}= 52,42\text{cm}^3$ je Bauteil

• *Bearbeitungsschritt 15: erste Längssteife heften / schweißen*

- Zusammenbau und heften: je Bauteil 10min

- Schweißen:

Nahtart: Doppelkehlnaht

Verfahren: MAG (135) mit $50\text{cm}^3/\text{h}$

Nahtlänge: je 5084mm

Nahtvolumen: $a=4\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}= 81,34\text{cm}^3$ je Bauteil

• *Bearbeitungsschritt 16: zweite Längssteife heften / schweißen*

- Zusammenbau und heften: je Bauteil 10min

- Schweißen:

Nahtart: Doppelkehlnaht

Verfahren: MAG (135) mit $50\text{cm}^3/\text{h}$

Nahtlänge: je 4278mm

Nahtvolumen: $a=4\text{mm} \rightarrow V_{\text{Naht}}= 68,45\text{cm}^3$ je Bauteil

• *Bearbeitungsschritt 17 und 18: Verformungssteifen heften / schweißen*

- Zusammenbau und heften: je Bauteil 3min

- Schweißen:

Nahtart: Doppelkehlnaht

Verfahren: MAG (135) mit 50cm³/h

Nahtlänge: je 1040mm (Rippentyp 1: Bl.20x200x400)

je 1440mm (Rippentyp 2: Bl.20x200x600)

Nahtvolumen: a=4mm → $V_{\text{Naht}} = 16,64\text{cm}^3$ (Rippentyp 1) je Bauteil

a=4mm → $V_{\text{Naht}} = 23,04\text{cm}^3$ (Rippentyp 2) je Bauteil

• *Allgemeine Fertigungszeiten:*

Die Zeiten, die für das Bohren der Löcher kalkuliert werden, richten sich nach der Dicke des zu bohrenden Bleches. Dabei gilt für 10mm Blechdicke 1 Minute Bohrzeit je Loch. Beim Bohren der Anschlussbleche kann die Bohrzeit um 25% abgemindert werden, da diese in einem Paket mit je 4 Blechen gebohrt werden. In Tabelle 55 und Tabelle 56 sind die Bohrzeiten zusammengefasst.

Blechdicke	Anzahl Löcher	Bohrzeit [h]
10mm	16	0,266
20mm	14	0,466
28mm	10	0,466
50mm	48	4,0
Summe		5,20

Tabelle 55: Fertigungszeit für Bohrzeit aller Bauteile außer Anschlussbleche

Blechdicke	Anzahl Löcher	Bohrzeit [h]
15mm	40	1,0
25mm	192	8,0
50mm	48	4,0
Summe (abzüglich 25%)		9,75

Tabelle 56: Fertigungszeit für bohren der Anschlussbleche

Ergebnisse Fertigungszeiten und Fertigungskosten

In den nachfolgenden Diagramm 56 bis Diagramm 64 werden die Fertigungszeiten und die resultierenden Fertigungskosten für alle Varianten zusammengestellt.

Legende:

Dicke Obergurt

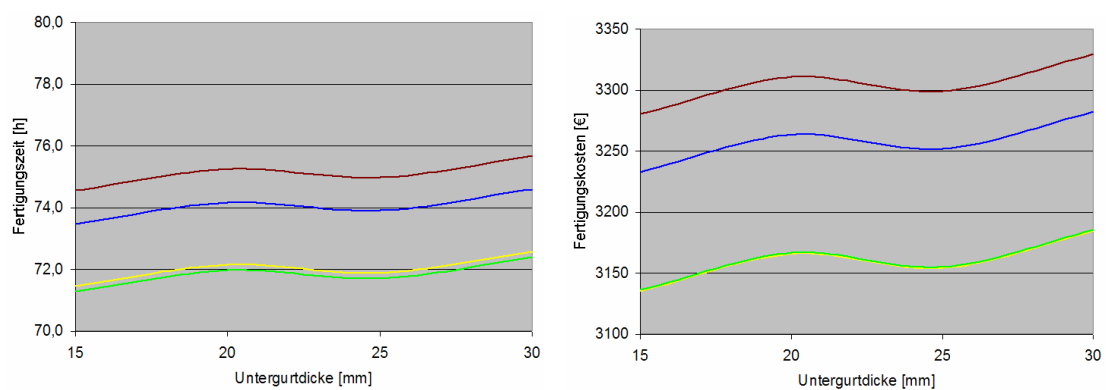


Diagramm 56: Fertigungszeiten und Fertigungskosten für $s=22\text{mm}$ in S235

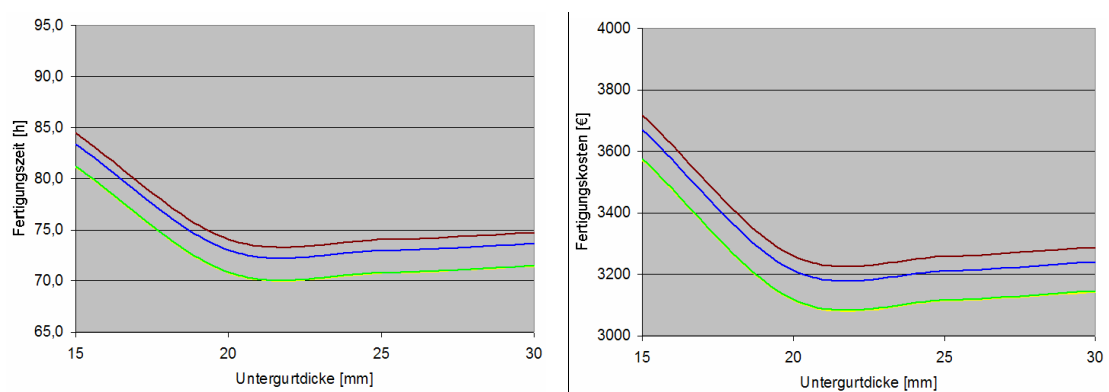


Diagramm 57: Fertigungszeiten und Fertigungskosten für $s=15\text{mm}$ in S235

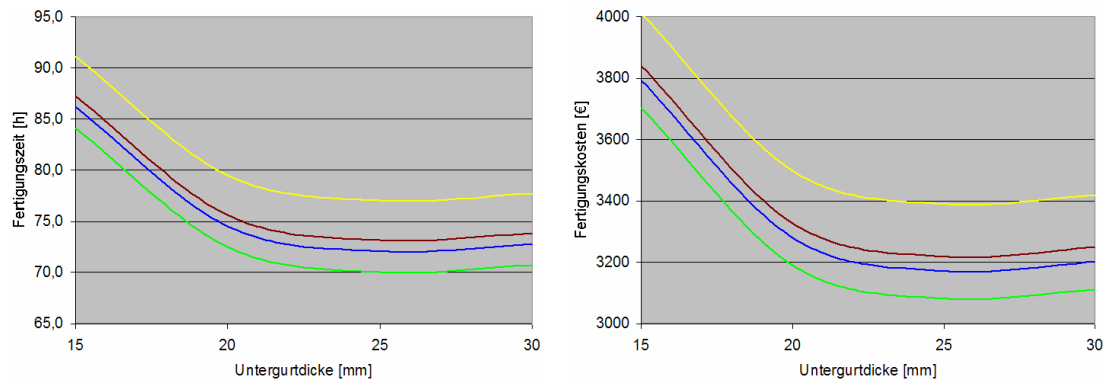


Diagramm 58: Fertigungszeiten und Fertigungskosten für $s=12\text{mm}$ in S235

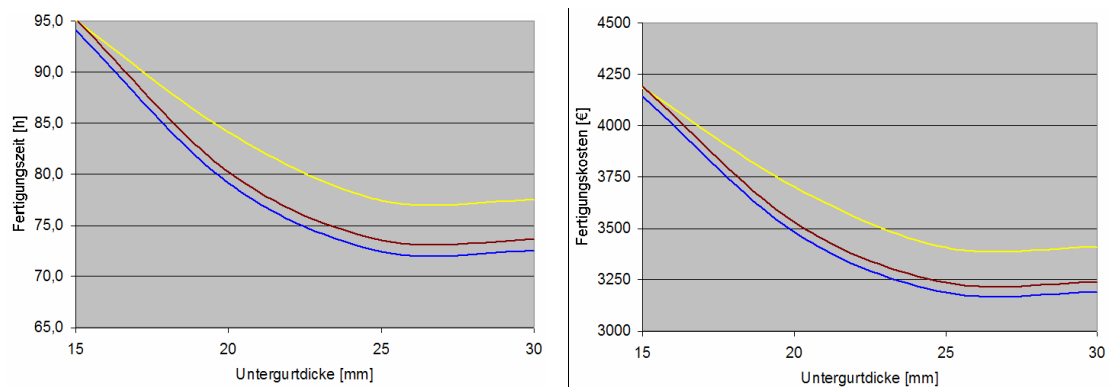


Diagramm 59: Fertigungszeiten und Fertigungskosten für $s=10\text{mm}$ in S235

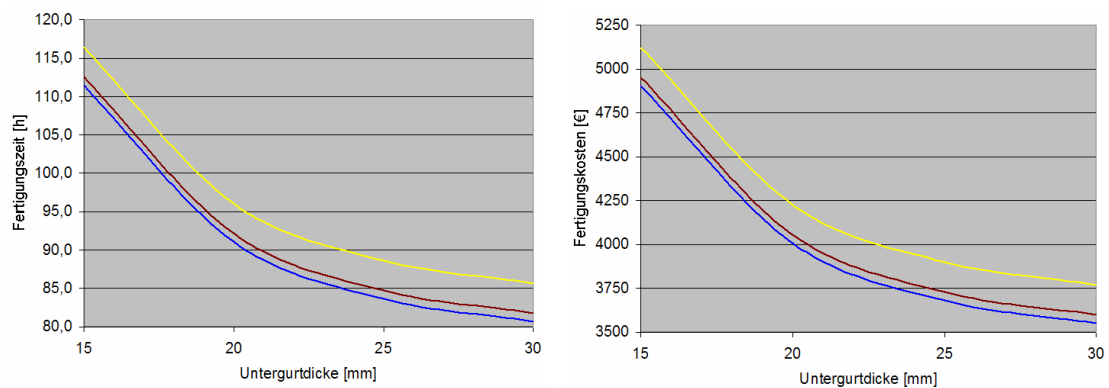


Diagramm 60: Fertigungszeiten und Fertigungskosten für $s=8\text{mm}$ in S235

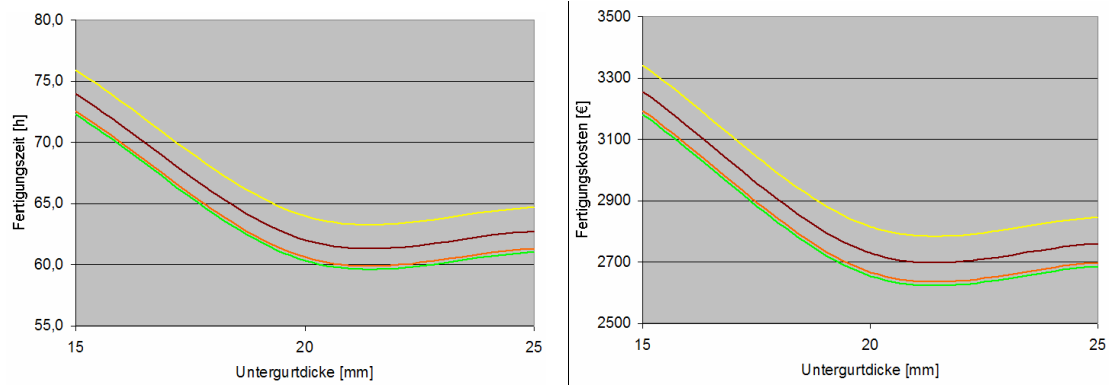


Diagramm 61: Fertigungszeiten und Fertigungskosten für $s=15\text{mm}$ in S355

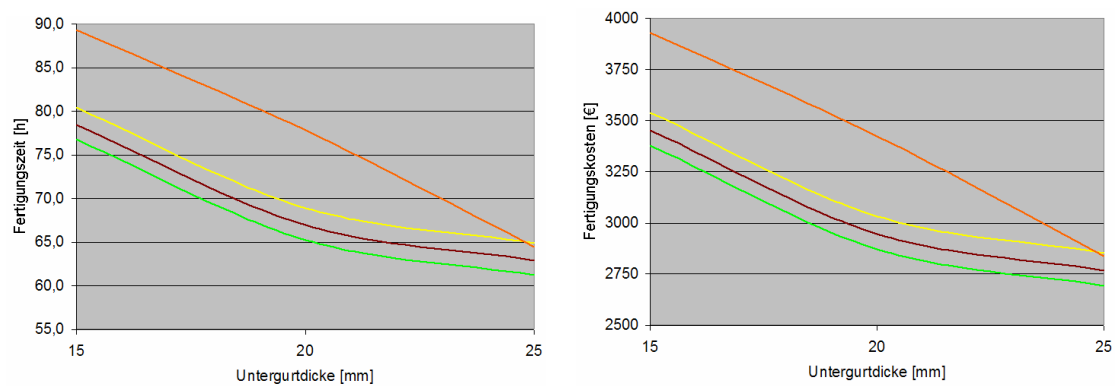


Diagramm 62: Fertigungszeiten und Fertigungskosten für $s=12\text{mm}$ in S355

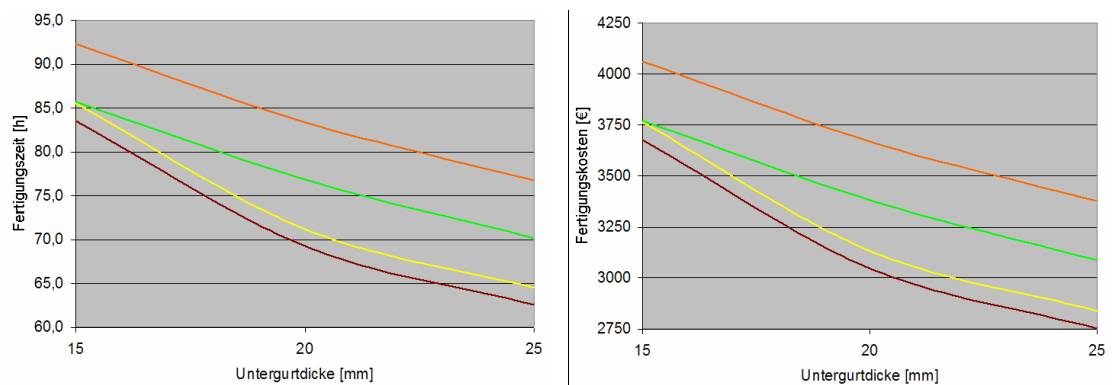


Diagramm 63: Fertigungszeiten und Fertigungskosten für $s=10\text{mm}$ in S355

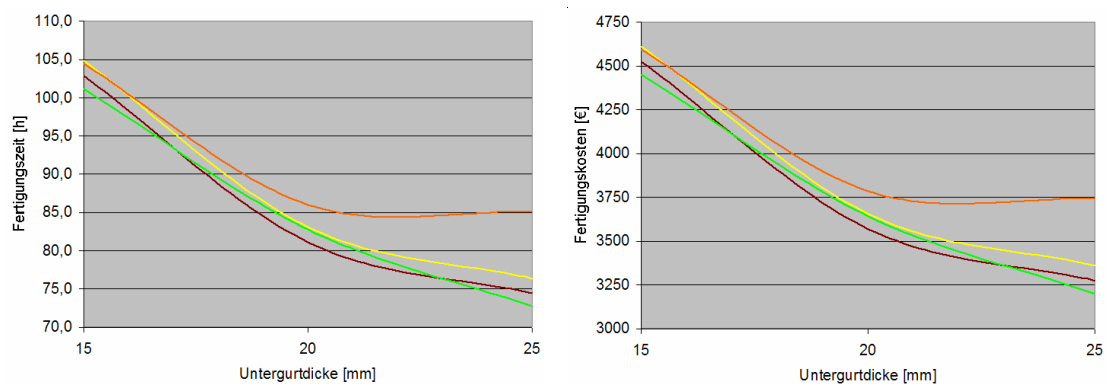


Diagramm 64: Fertigungszeiten und Fertigungskosten für $s=8\text{mm}$ in S355

8.3 Gesamtkostenermittlung

Als Gesamtkosten wird in diesem Abschnitt die Summe aus Fertigungs- und Materialkosten (ohne Anschlussbleche) aufgezeigt werden. Daran kann schlussendlich abgeleitet werden, welche Variante sich wirtschaftlich am günstigsten auswirkt.

Legende:

Dicke Obergurt

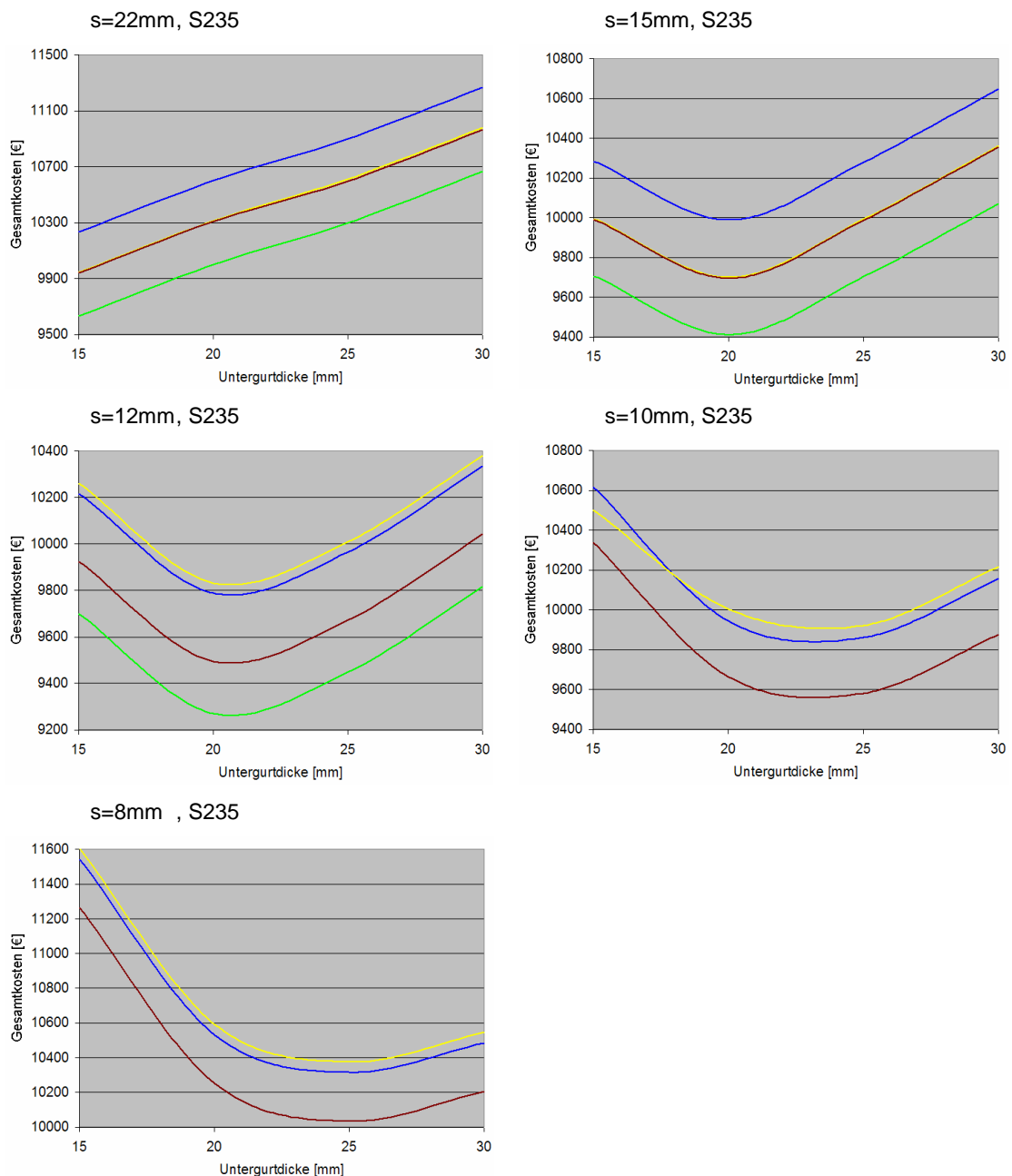
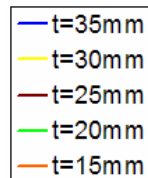


Diagramm 65: Gesamtkostenzusammenfassung für S235

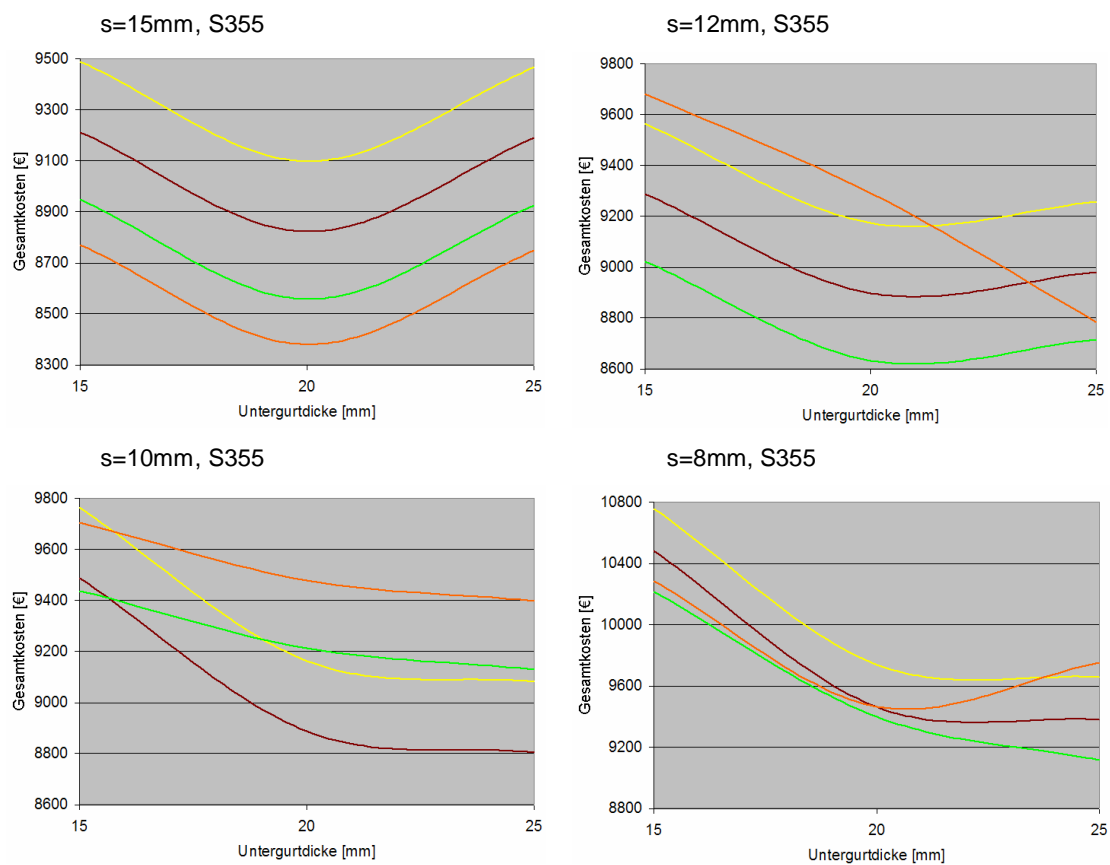


Diagramm 66: Gesamtkostenzusammenfassung für S355

9 Auswertung der Ergebnisse

9.1 Auswertung der konstruktiven Unterschiede

Anhand der diversen Nachweise zur Sicherstellung der Tragfähigkeit, sowie Gebrauchstauglichkeit, haben sich aus statischer Sicht zahlreiche konstruktive Maßnahmen ergeben. Der statische Teil ist dabei so aufgebaut, dass für alle zur Auswahl stehenden Materialkombinationen die konstruktiven Forderungen abgeleitet werden. Zusammengefasst sind folgende konstruktiven Forderungen zu berücksichtigen:

- zusätzliche Materialaufdickung im Stegblech
 - Dicke der Aufdickung in Abhängigkeit der Materialfestigkeit
 - Aufdickungslänge in Abhängigkeit der Lasteinleitungslänge der Zuglasche
- Länge der Zuglasche (Lasteinleitungslänge)
 - In Abhängigkeit der Steg- und Untergurtdicke
- Zusätzliche Materialaufdickung am Obergurt
 - Aufdickung in Abhängigkeit der Materialfestigkeit
 - Aufdickungslänge in Abhängigkeit der Obergurt- und Stegdicke
- Zusätzliche Beulaussteifungen
 - Quersteife an der Stelle $x=7,1\text{m}$
 - Quersteife $x=7,1\text{m}$ + Längssteife TF1
 - Quersteife $x=7,1\text{m}$ + Längssteife TF1/TF2
 - Quersteife $x=7,1\text{m}$ und $x=3,5\text{m}$ + Längssteife TF1/TF2/TF3
- Zusätzliche Verformungssteifen
 - Getrennte Betrachtung für die Bereiche $x=0\text{m}$ bis $x=5\text{m}$, sowie $x=5\text{m}$ bis $x=10\text{m}$
 - Unterscheidung zwischen Rippentyp 1 (Bl.20x200x400) und Rippentyp 2 (Bl.20x200x600)
 - Individuelle Festlegung des maximalen Abstandes zwischen zwei benachbarten Rippen im Bereich 0,4m bis 2,0m

Trotz der zahlreichen konstruktiven Maßnahmen sind die Varianten mit 20mm Obergurt und 10mm sowie 8mm Stegblechdicke in S235 aufgrund der Spannungsüberschreitung im Obergurt nicht ausführbar.

Anhand der nachfolgenden Tabelle 57 soll aufgezeigt werden, wie die einzelnen Parameter die verschiedenen Nachweisstellen beeinflusst haben. Dabei wurden jeweils die Parameter mit großem und geringem Einfluss bei der Nachweisführung berücksichtigt. Unter der Bezeichnung „großer Einfluss“ ist dabei zu verstehen, dass dieser Parameter für die hauptsächlichen Ergebnisunterschiede verantwortlich ist. Unter „geringem Einfluss“ ist zu verstehen, dass dieser Parameter im Gegensatz zu anderen das Ergebnis deutlich geringer beeinflusst, dennoch nicht unberücksichtigt bleiben darf.

NW- Art	Nachweisstelle	Materialdicke			Materialfestigkeit
		Stegblech	Untergurt	Obergurt	
Globale Spannungen	Spannung infolge Lasteinleitung der Zuglasche	■	■	x	■
	Schubspannung Stegblech	■	x	x	■
	Spannung Obergurt	□	x	■	■
	Spannung Untergurt	□	■	x	■
Lokale Spannungen	Konzentrierte Lasteinleitung Untergurt	■	■	x	■
	Konzentrierte Lasteinleitung Stegblech	■	■	x	■
Stabilität	Beulsicherheitsnachweis	■	□	■	x
	Biegedrillknicknachweis	□	□	■	x
GZG	Globale Verformung	□	■	■	x
	Lokale Verformung	■	■	x	x
Legende: ■ großer Einfluss □ geringer Einfluss x keine Einfluss bzw. vernachlässigbar geringer Einfluss					

Tabelle 57: Einflüsse einzelner Parameter auf die Nachweisstellen

Um die konstruktiven Forderungen für jede Variante aufstellen zu können, wird im Folgenden ein Struktogramm vorgestellt, anhand dessen eine Variantenzusammenstellung erfolgen kann. Das Struktogramm ist dabei bezogen auf die Ergebnisse der FEM-Berechnung.

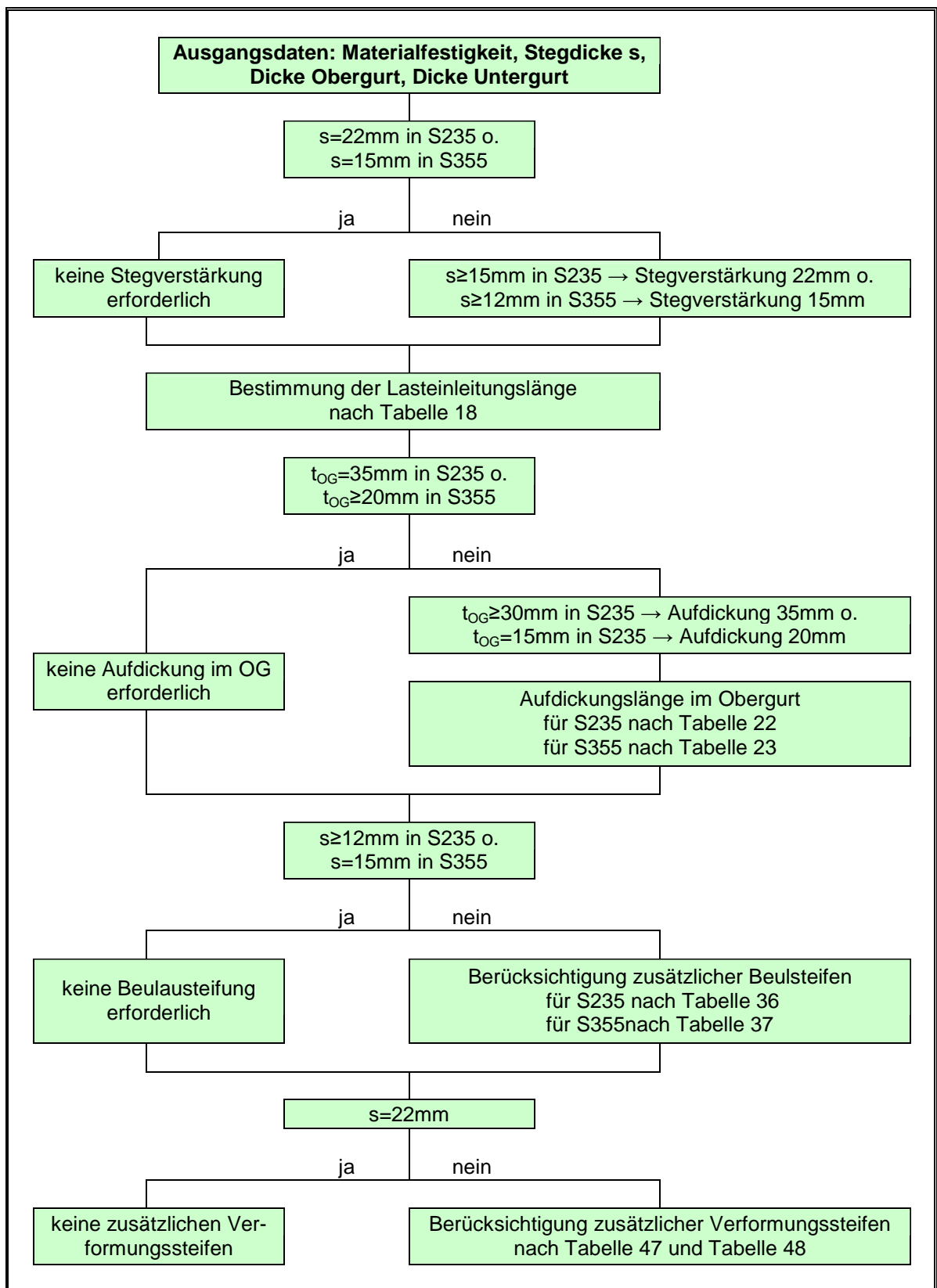


Abbildung 106: Struktogramm zur Variantenaufstellung

9.2 Auswertung der Kalkulation

Auswertung der Bauteilgewichte und der Materialkostenermittlung

In Abhängigkeit der jeweiligen Varianten wurden im Kapitel 9 die Bauteilgewichte (ohne Anschlussbleche) und Materialkosten (ohne Anschlussbleche) in Diagramm 47 bis Diagramm 64 übersichtlich dargestellt. Dabei ist eine Gewichts Differenz, beim Vergleich aller Varianten, von 4106kg (Vergleich Var.1 [s=22mm, t_{OG}=35mm, t_{UG}=30mm in S235] mit 13331kg und Var.92 [s=15mm, t_{OG}=15mm, t_{UG}=15mm in S355] mit 9225 nach Tabelle 184 bis Tabelle 187) erreicht worden. Bezogen auf das maximale Gesamtgewicht von 13331kg bedeutet dies eine Gewichtseinsparung von 30,8%. Vergleicht man nur die Unterschiede einer Materialsorte, so konnte für S235 eine Gewichtseinsparung von 3391kg (Vergleich Var.1 [s=22mm, t_{OG}=35mm, t_{UG}=30mm] mit 13331kg und Var.48 [s=12mm, t_{OG}=20mm, t_{UG}=15mm] mit 9940kg nach Tabelle 184 und Tabelle 185) und damit von 25,4% bezogen auf das Maximalgewicht erzielt werden. Bei der Ausführung in S355 ist ein Unterschied von 1779kg (Vergleich Var.81 [s=15mm, t_{OG}=30mm, t_{UG}=25mm] mit 11004kg und Var.92 [s=15mm, t_{OG}=15mm, t_{UG}=15mm] mit 9225kg nach Tabelle 186 und Tabelle 187) und damit einer Einsparung von 16,2% bezogen auf Variante 81 erreicht worden.

Bezug nehmend auf die gerade gegenübergestellten Varianten entsteht hinsichtlich der Materialkosten eine maximale Differenz von 2141€ und damit 26,8%, bezogen auf die Maximalkosten von 7987€. Im Vergleich ist für S235 eine Differenz von 1990€ und damit 24,9% und für S355 eine Differenz 1105€ und somit 15,9% erzielt worden. Die verhältnismäßig geringe finanzielle Einsparung kann mit dem momentan sehr niedrigen Stahlpreis begründet werden. Dass die prozentualen Unterschiede zwischen Bauteilgewicht und Materialpreis nicht gleich ausfallen, ist damit zu begründen, dass zum einem die Profilgewichte der Verbände für alle Varianten konstant sind und zum anderen der Materialpreis je t für Profile über dem von Grobblechen je t liegt.

Im Folgenden werden die allgemeinen Tendenzen, welche sich aus Diagramm 47 bis Diagramm 55 für Bauteilgewichte und Materialkosten ableiten lassen, kurz zusammengefasst werden:

- Eine Reduzierung der Materialdicken führt nicht unweigerlich zu einer Minimierung der Materialkosten, da die zusätzlichen Aussteifungs- und Verstärkungsmaßnahmen zusätzliches Eigengewicht in die Konstruktion bringen.
- Insbesondere bei Stegblechdicken von 8mm und 10mm in Kombination mit Untergurtdicken von 15mm in S235 ist diese Gewichtserhöhung durch zusätzliche Aussteifungen spürbar.
- In S355 fallen diese Verhältnisse sogar so aus, dass bei einer Obergurtdicke von 15mm das Bauteilgewichte im Bezug zu 20mm Obergurt annähernd gleich oder sogar höher ausfällt.

Anhand der nachfolgenden Diagramme wird für die gegenübergestellten Varianten verdeutlicht, wie sich die Materialverhältnisse der Einzelbauteile im Bezug zum Gesamtgewicht der jeweiligen Varianten verhalten. Zusätzlich dazu werden die Varianten 76 und 128 vorgestellt, da diese mit dem Maximum an Aussteifungen versehen sind.

Legende:

Bauteilgewicht

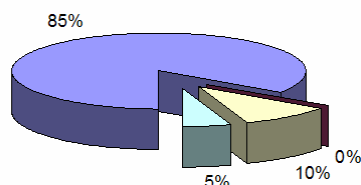
■ Steg, UG, OG, Zuglasche, allg. Bauteile

■ Beulsteifen, Verformungssteifen, Aufdickungen

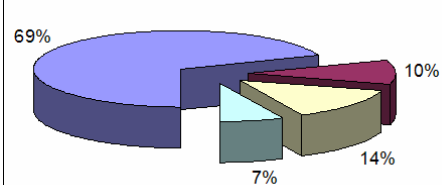
■ Verbände

■ Bauteile zum Anschluss an Brückenfußpunkt

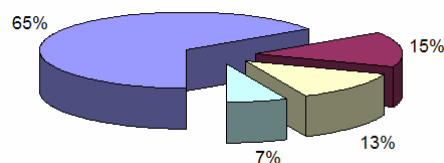
Var. 1 [s=22mm, t_{OG}=35mm, t_{UG}=30mm, S235]



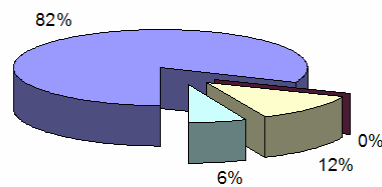
Var. 48 [s=12mm, t_{OG}=20mm, t_{UG}=15mm, S235]



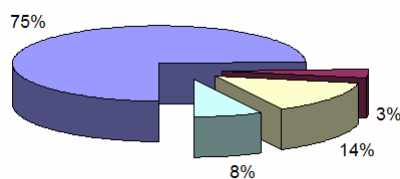
Var. 76 [s=8mm, t_{OG}=25mm, t_{UG}=15mm, S235]



Var. 81 [s=15mm, t_{OG}=30mm, t_{UG}=25mm, S355]



Var. 92 [s=15mm, t_{OG}=15mm, t_{UG}=15mm, S355]



Var. 128 [s=8mm, t_{OG}=15mm, t_{UG}=15mm, S355]

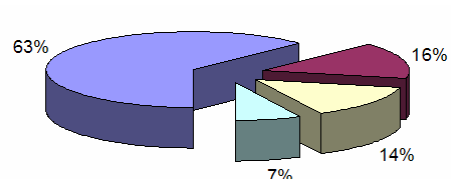


Diagramm 67: Anteil des Bauteilgewichtes ausgewählter Vorbauschabelvarianten

Die Verhältnismäßigkeiten zeigen, dass im Maximum 16% des Bauteilsgewichts auf die zusätzlichen Aussteifungen entfallen. Im Gegensatz dazu sind bei den Varianten 1 und 81 keinerlei zusätzlicher Aussteifungen vorhanden.

Auswertung der Fertigungszeiten und Fertigungskosten

Im Gegensatz zu den Materialkosten zeigen sich hier umgekehrte Verhältnisse, das heißt, je dünner die Untergurt- und Stegdicke, desto höher fallen die Fertigungszeiten und damit Fertigungskosten aus. Dies ist leicht damit zu begründen, dass diese beiden Parameter hauptsächlich für die Notwendigkeit zusätzlicher Aussteifungen und Aufdickungen verantwortlich sind. Jedoch zeigt sich auch, dass Kombinationen aus dicken Materialstärken nicht automatisch die geringsten Fertigungszeiten aufweisen. Zwar sind hier keine zusätzlichen konstruktiven Maßnahmen erforderlich, jedoch wird die Fertigungszeit hauptsächlich durch die durchzuführenden Schweißzeiten bestimmt. Da das Nahtvolumen der Stumpfstoße in Abhängigkeit der Materialstärke exponentiell zunimmt, steigen auch die Fertigungszeiten entsprechend an. Somit ist eine Ausführung mit möglichst dicken Blechen aus Sicht der Fertigung nicht in jedem Fall ratsam.

Im Vergleich der Varianten hinsichtlich der Fertigungszeiten werden im Maximum Einsparungen von 56,1h (Vergleich Var.72 [$s=8\text{mm}$, $t_{OG}=30\text{mm}$, $t_{UG}=15\text{mm}$ in S235] mit 116,4h und Var.88 [$s=15\text{mm}$, $t_{OG}=20\text{mm}$, $t_{UG}=15\text{mm}$ in S355] mit 60,3h nach Tabelle 192 bis Tabelle 195) und somit von 48,2% erzielt. Hinsichtlich der Fertigungskosten sind somit Einsparungen von 2470€ möglich. Der Vergleich innerhalb einer Materialsorte zeigt immerhin für S235 eine Differenz von 46,4h und somit 39,9% (Vergleich Var.72 [$s=8\text{mm}$, $t_{OG}=30\text{mm}$, $t_{UG}=15\text{mm}$ in S235] mit 116,4h und Var.46 [$s=12\text{mm}$, $t_{OG}=20\text{mm}$, $t_{UG}=25\text{mm}$ in S235] mit 70,0h nach Tabelle 192 und Tabelle 193) und für S355 eine Differenz von 44,5h und somit 42,5% (Vergleich Var.88 [$s=15\text{mm}$, $t_{OG}=20\text{mm}$, $t_{UG}=20\text{mm}$ in S355] mit 60,3h und Var.119 [$s=8\text{mm}$, $t_{OG}=30\text{mm}$, $t_{UG}=15\text{mm}$ in S355] mit 104,8h nach Tabelle 194 und Tabelle 195).

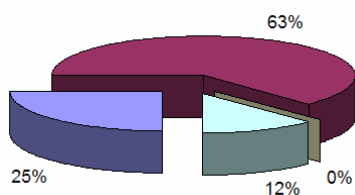
Analog zum vorangegangenen Abschnitt sollen auch die einzelnen Anteile der Fertigungszeiten für ausgewählte Varianten veranschaulicht werden.

Legende:

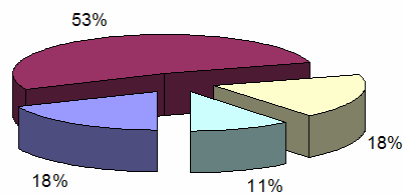
Fertigungszeiten

- Brennschneiden Bleche,
Bohren der Löcher
- Allgemeine Schweißarbeiten
- Schweißarbeiten zusätzlicher
Bauteile
- Fertigung Anschlussbleche
(brennen, bohren)

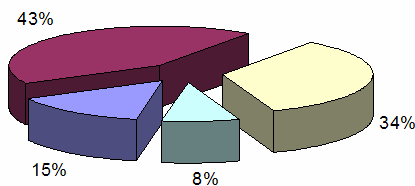
Var. 1 [s=22mm, t_{OG}=35mm, t_{UG}=30mm, S235]



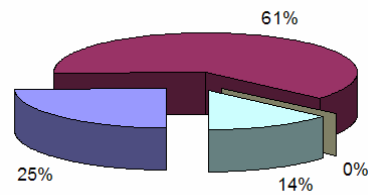
Var. 48 [s=12mm, t_{OG}=20mm, t_{UG}=15mm, S235]



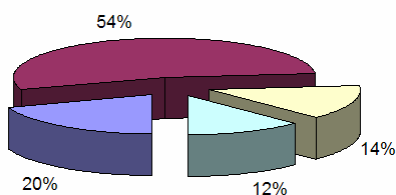
Var. 76 [s=8mm, t_{OG}=25mm, t_{UG}=15mm, S235]



Var. 81 [s=15mm, t_{OG}=30mm, t_{UG}=25mm, S355]



Var. 92 [s=15mm, t_{OG}=15mm, t_{UG}=15mm, S355]



Var. 128 [s=8mm, t_{OG}=15mm, t_{UG}=15mm, S355]

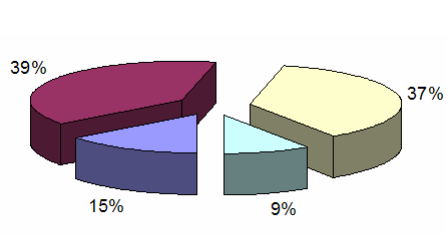


Diagramm 68: Anteil der Fertigungszeiten ausgewählter Vorbauschnabelvarianten

Anhand der Aufteilung der Fertigungszeiten lassen sich erhebliche Unterschiede erkennen. In Variante 1 entfällt knapp 2/3 der Zeit auf die allgemeinen Schweißarbeiten am Hauptträger. Hingegen ist bei Variante 128 der Anteil der Fertigungszeit von allgemeinen Schweißarbeiten im Verhältnis zu den Schweißarbeiten für zusätzliche Bauteile mit je knapp 40% ausgeglichen. Betrachtet man dazu noch einmal das Diagramm 47 bis Diagramm 55, so zeigt sich, dass ein Anteil von 15% zusätzlichen Materialverbrauchs für Aussteifungen und Aufdickungen einen Anteil der Fertigungszeit von 40% nach sich zieht.

Auswertung der Gesamtkosten

Aufgrund des gegenläufigen Verhaltens von Fertigungs- und Materialkosten gleichen sich die Varianten in der finanziellen Zusammenfassung aus. Demzufolge fallen die erzielten Gesamtkostenunterschiede deutlich geringer aus. Im Konkreten beläuft sich die maximale Gesamtkostendifferenz auf 2947€, dies bedeutet eine Ersparnis von 25,4% (Vgl. Var.72 [s=8mm, t_{OG}=30mm, t_{UG}=15mm in S235] mit 11603€ und Var.91 [s=15mm, t_{OG}=20mm, t_{UG}=15mm in S355] mit 8656€ nach Tabelle 196 bis Tabelle 199). Der Vergleich innerhalb einer Materialsorte zeigt, dass in S235 eine Kostendifferenz von maximal 2333€ und somit 20,1% zu erwarten ist (Vgl. Var.47 [s=12mm, t_{OG}=20mm, t_{UG}=20mm in S235] mit 9270€ und Var.72 [s=8mm, t_{OG}=30mm, t_{UG}=15mm in S235] mit 11603€ nach Tabelle 196 und Tabelle 197), in S355 eine Differenz von 2404€ und somit 21,7% (Vgl. Var.91 [s=15mm, t_{OG}=15mm, t_{UG}=20mm in S355] mit 8656€ und Var.119 [s=8mm, t_{OG}=30mm, t_{UG}=15mm in S355] mit 11060€ nach Tabelle 198 und Tabelle 199).

Anhand von Diagramm 56 bis Diagramm 64 ist deutlich zu erkennen, dass Varianten mit 20mm Untergurt stets die geringsten Kosten verursachen. Dies ist damit zu begründen, dass bei kleineren Gurtdicken aufgrund der stark anwachsenden Fertigungskosten und der Materialkosten für zusätzliche Bauteile (Aussteifungen) die Gesamtkosten zunehmen. Bei dickeren Gurtdicken entfällt zwar ein Teil der Fertigungskosten, jedoch fallen aufgrund des hohen Eigengewichtes die Kosten für Material entsprechend höher aus.

Resümee

In Anbetracht der Situation, dass zwischen den einzelnen Varianten (bezogen auf alle Varianten) hinsichtlich des finanziellen Aspektes teils nur geringfügige Unterschiede auftreten, kann die Wahl des letztendlich gefertigten Vorbauschnabels unter vier Gesichtspunkten erfolgen:

- Die Wahl größerer Materialabmessungen sorgt für zusätzliche „Robustheit“ und schafft somit zusätzliche Sicherheiten für unerwartet auftretende Komplikationen während des Verschubs.
- Die Kalkulation hinsichtlich Materialverbrauchs und die daraus resultierenden Kosten sind besser planbar, im Gegensatz zur Abschätzung von Fertigungszeiten und Fertigungskosten. Somit ist schwerpunktmäßig eine Variante mit höherem Materialverbrauch und geringeren Fertigungskosten zu bevorzugen.
- Ein erhöhter Fertigungsaufwand erhöht die Fehlerwahrscheinlichkeit sowie den Prüfaufwand, beispielsweise Schweißnahtprüfung mittels Ultraschall oder Röntgen.
- Gleiche Blechdicken für Ober- und Untergurt sind einfacher bei der Bestellung.

Da der Aspekt zusätzlicher Sicherheit als der wichtigere angesehen werden kann, stehen folgende Varianten in der engeren Auswahl:

- Var. 31 [s=15mm, t_{OG}=20mm, t_{UG}=20mm in S235] mit 9410€
- Var. 42 [s=12mm, t_{OG}=25mm, t_{UG}=25mm in S235] mit 9673€
- Var. 47 [s=12mm, t_{OG}=20mm, t_{UG}=20mm in S235] mit 9270€
- Var. 58 [s=10mm, t_{OG}=25mm, t_{UG}=25mm in S235] mit 9581€
- Var. 88 [s=15mm, t_{OG}=20mm, t_{UG}=20mm in S355] mit 8845€
- Var. 96 [s=12mm, t_{OG}=25mm, t_{UG}=25mm in S355] mit 9287€
- Var. 100 [s=12mm, t_{OG}=20mm, t_{UG}=20mm in S355] mit 8912€
- Var. 108 [s=10mm, t_{OG}=25mm, t_{UG}=25mm in S355] mit 9101€

Der Vorteil in diesen ausgewählten Varianten liegt darin, dass jeweils die Gurte in gleicher Stärke ausgeführt werden. Dies bietet Vorteile bei der Materialbestellung und Beschaffung. Die Wahl der Stahlsorte ist stark davon abhängig, welche Lieferbedingungen und Lieferzeiten zu erwarten sind. Da die Bleche mit „Bahnnorm“ (siehe [11]) bestellt werden sollen und diese vorrangig in S355 zu beziehen sind, fällt die Auswahl auf Variante 96. Diese ist zwar nicht die finanziell günstigste Variante, jedoch kann das Verhältnis zwischen zusätzlichen Tragwerksreserven und Gesamtkosten als guter Kompromiss angesehen werden.

9.3 Vergleich FEM zu analytischer Berechnungsmethode

Als abschließende Auswertung soll eine Gegenüberstellung zwischen FEM und analytischer Berechnungsmethode erfolgen. Die Unterschiede werden dabei getrennt nach den Nachweisarten zusammengefasst und aufgezeigt.

Gegenüberstellung der Ergebnisse beim Nachweis der globalen Spannungen:

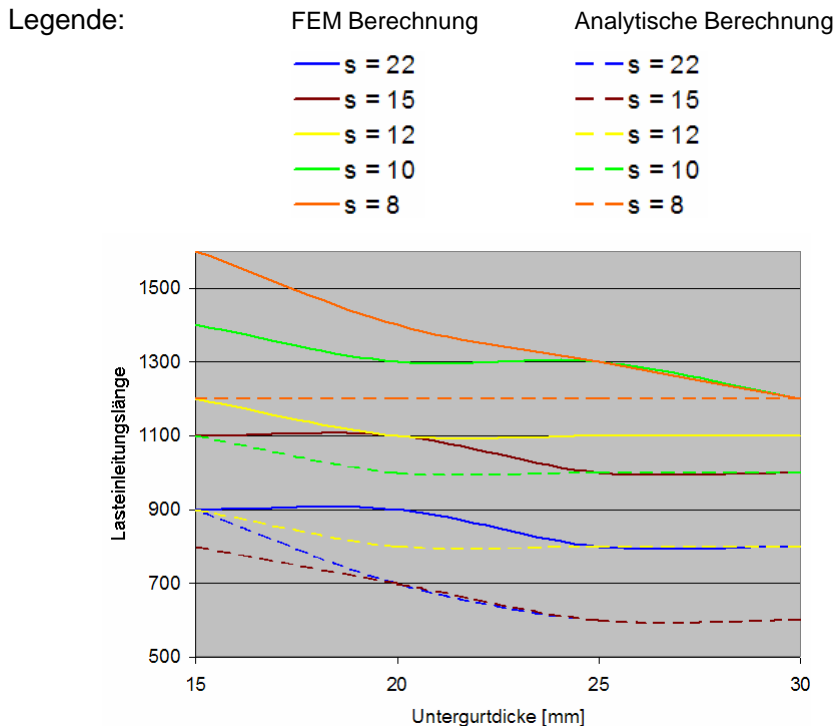


Diagramm 69: Vergleich FE-Berechnung mit analytischer Berechnung am Beispiel der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für S235

Im Vergleich der Lasteinleitungslängen nach den beiden Berechnungsmethoden zeigt sich, dass nach FE-Methode die Einleitungslängen meist 200mm länger ausfallen als nach analytischer Berechnung. Dies wird damit begründet, dass die individuelle Festlegung der Lasteinleitungslänge im FEM anhand des Spannungsverlaufes einen gewissen Spielraum von $\pm 100\text{mm}$ erlaubt hat. Als maßgebendes Kriterium für die Festlegung galt eine Spannungsüberschreitung an jeder Stelle im Bereich der Zuglasche. Im Gegensatz dazu basiert die Festlegung nach analytischer Methode auf den Nachweis einer definierten Querschnittsstelle. Somit wird das Spannungsverhalten über die Länge der Zuglasche nicht optimal abgedeckt. Dies führt in der Regel dazu, dass kürze Lasteinleitungslängen bemessen wurden. Die Abweichung der Ergebnisse kann im Mittel mit rund 25% Längendifferenz erfasst werden, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Längen nur in Schritten zu je 100mm untersucht wurden, was rund 10% Differenz je Schritt bedeutet.

Schubspannung im Stegblech

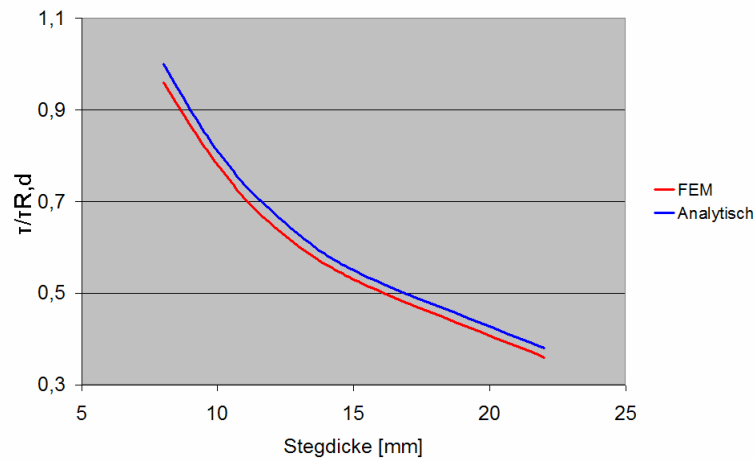


Diagramm 70: Vergleich FEM zu analytischer Berechnung am Beispiel der Schubspannung im Stegblech für S235

Der Vergleich zeigt, dass die maximale Differenz bei nur 3% liegt, wobei das FEM Ergebnis die jeweils geringere Auslastung erzielt.

Globale Spannung im Obergurt

Der Vergleich der Spannungen im Obergurt ohne Aufdickung erfolgt anhand des Materials S355. Grundlage ist dabei Tabelle 150 bis Tabelle 153 im Anhang C für die FE-Berechnung, sowie Tabelle 94 im Anhang B für Nachweisstelle 1 nach analytischer Berechnung.

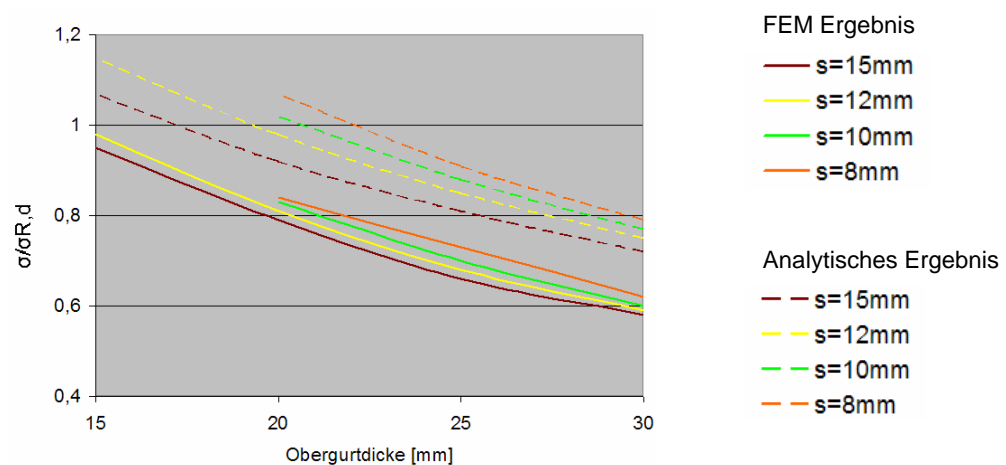


Diagramm 71: Vergleich FEM zu analytischer Berechnung am Beispiel der Spannungen im Obergurt ohne Aufdickungsblech für S355

Es zeigt sich, dass die Spannungsverläufe zwar identisch sind, jedoch liegen die Handrechenenergebnisse rund 15% über denen der FEM Berechnung. Dies wird damit begründet, dass bei der analytischen Berechnung mit dem Querschnitt an der Stelle 9,6m (Druckgurt/Steg/Zuglasche) und das an der Stelle voll wirkendem Biegemoment angesetzt wurde. Dabei bleibt jedoch unberücksichtigt, dass die Spannungen nicht schlagartig vom Gesamtquerschnitt in den verminderten Querschnitt zwischen Zuglasche und Druckgurt übergehen, sondern eine kontinuierliche Kraftüberleitung stattfindet. Somit liegt das Ergebnis der analytischen Berechnung stark auf der sicheren Seite.

Die Unterschiede in den festgelegten Aufdickungslängen, welche für die Varianten mit überschrittener Grenzspannung definiert wurden, sind zum einen auf das bereits beschriebene Problem zurückzuführen, zum anderen traten bei sehr kleinen Obergurtstärken im FEM Instabilitäten auf, was konstruktiv durch eine Obergurtverstärkung mit entsprechender Länge beseitigt werden konnte. Diese Instabilität wurde nach analytischer Berechnung für S355 und $t_{OG}=15\text{mm}$ über die b/t -Verhältnisse im Druckgurt nachgewiesen. Jedoch zeigten sich die daraus resultierenden Aufdickungslängen mit mehr als 5m Länge als nicht wirtschaftlich, sodass als minimale Dicke in S355 nach analytischer Berechnung 20mm als sinnvoll erscheinen.

Globale Spannungen im Untergurt

Da die Spannungen im Untergurt nicht für alle, sondern nur für die Untergurtdicke von 15mm aufgezeigt wurde, um somit zu beweisen, dass selbst bei minimalen Materialdickenabmessungen keine globale Überschreitung zu erwarten ist.

Die Auslastung mit rund 96% nach FE-Berechnung und 93% nach analytischer Berechnung zeigt einen Unterschied von 3%.

Lokale Spannung im Untergurt

Die lokale Spannung im Untergurt wurde nach FE-Methode ebenfalls nur für die minimale Untergurtdicke von 15mm aufgezeigt. Dabei liegt die Spannung mit rund $20,0\text{kN/cm}^2$ und somit 92% Auslastung im verträglichen Bereich. Nach analytischer Berechnung zeigen sich jedoch große Unterschiede. Die Auslastung für $t_{UG}=20\text{mm}$ liegt bei 96%, bei $t_{UG}=15\text{mm}$ schon bei 170%. Dies stellt eine erhebliche Differenz dar. Somit wäre nach analytischer Berechnung eine Ausführung mit $t_{UG}=15\text{mm}$ selbst in S355 nicht möglich. Alle darüber liegenden Gurtdicken weisen verträgliche Spannungen in S235 auf. Grund für diese Abweichungen ist das Berechnungsmodell, welches der Spannungs Berechnung von Unterflanschlaufkatzen [14] entnommen wurde, wobei aus mehreren Berechnungsansät-

zen der nach SAHMEL gewählt wurde. Weiterhin müssen aufgrund dieser Berechnungsgrundlagen die Einwirkungen des Verschublaggers zu einer Resultierenden zusammengefasst werden, was zu einer übermäßigen punktförmigen Belastung führt und besonders bei kleinen Flanschdicken eine Überbeanspruchung hervorruft. Somit ist die analytische Berechnung bei kleinen Gurtstärken als unzureichend anzusehen.

Konzentrierte Lasteinleitung im Stegblech:

Der Nachweis der konzentrierten Lasteinleitung nach FEM-Berechnung ist aufgrund des auf einen lokalen Bereich breit gefächerten Spannungsverlaufs schwierig mit konkreten Zahlenwerten zu belegen. Vielmehr ist eine Abschätzung der im Mittel wirkenden Spannung möglich. Die Abweichungen zur analytischen Berechnung zeigen Unterschiede von maximal 20% in der Auslastung, wobei nach FEM stets höhere Beanspruchungen entstehen. Diese Unterschiede können wie folgt begründet werden. Die im FE-Programm nachgewiesene Vergleichsspannung σ_v berücksichtigt sowohl die aus konzentrierter Lasteinleitung wirkende Spannung σ_z als auch die global wirkende Schubspannung τ . Bei Stegdicken von $s=10\text{mm}$ und $s=8\text{mm}$ verlagert sich das Maximum σ_v von der Kontaktstelle Steg/Flansch in Richtung Stegmitte, da die steigende Schubspannung in Stegmitte zunehmend maßgebend wird. Der Nachweis der Vergleichsspannung nach analytischer Berechnung ist zwar ebenso möglich, hingegen erfolgt der Nachweis nur im Schnitt 1-1 nach Abbildung 82, also Oberkante Halsnaht. Problem beim Nachweis in Stegmitte ist, dass aufgrund der in DIN 18800-1 definierten Lastausbreitung mit 1:2,5, in Stegmitte praktisch keine Spannung aus σ_z entsteht, wodurch eine Überlagerung mit der Schubspannung stets zu kleineren Beanspruchungen im Gegensatz zum Schnitt 1-1 führt.

Nachweis der Beulsicherheit

Da die ermittelten Werte zur Gewährleistung ausreichender Beulsicherheit grundverschieden sind, ist somit keine direkte Gegenüberstellung möglich. Verglichen werden können nur die resultierenden konstruktiven Maßnahmen in Form zusätzlicher Quer- und Längssteifen.

Legende zu Tabelle 58 :

- Q zusätzliche Quersteife an der Stelle $x=7,1\text{m}$
- L zusätzliche Längssteife TF1 oder TF1/TF2 oder TF1/TF2/TF3

Materialdicke			Aussteifungsmaßnahmen nach FE-Berechnung	Aussteifungsmaßnahmen nach analytischer Berechnung
Steg	Untergurt	Obergurt		
12mm	25mm	30 mm	keine	keine
		25 mm	keine	keine
		20 mm	keine	keine
		15 mm	keine	keine
	20mm	30 mm	keine	keine
		25 mm	keine	keine
		20 mm	keine	keine
		15 mm	Q + L TF1	keine
	15mm	30 mm	keine	keine
		25 mm	keine	keine
		20 mm	keine	keine
		15 mm	Q + L TF1	keine
10mm	25mm	30 mm	keine	keine
		25 mm	keine	Q + L TF1
		20 mm	Q + L TF1	Q + L TF1
		15 mm	Q + L TF1/TF2	Q + L TF1/TF2
	20mm	30 mm	keine	keine
		25 mm	keine	Q + L TF1
		20 mm	Q + L TF1	Q + L TF1
		15 mm	Q + L TF1/TF2	Q + L TF1/TF2
	15mm	30 mm	Q	Q + L TF1
		25 mm	Q	Q + L TF1
		20 mm	Q + L TF1	Q + L TF1
		15 mm	Q + L TF1/TF2	Q + L TF1
8mm	25mm	30 mm	Q + L TF1	Q + L TF1/TF2
		25 mm	Q + L TF1	Q + L TF1/TF2
		20 mm	Q + L TF1	Q + L TF1/TF2
		15 mm	Q + L TF1/TF2/TF3	- ¹⁾
	20mm	30 mm	Q + L TF1	Q + L TF1/TF2
		25 mm	Q + L TF1	Q + L TF1/TF2
		20 mm	Q + L TF1/TF2	Q + L TF1/TF2
		15 mm	Q + L TF1/TF2	- ¹⁾
	15mm	30 mm	Q + L TF1/TF2	Q + L TF1/TF2
		25 mm	Q + L TF1/TF2	Q + L TF1/TF2
		20 mm	Q + L TF1/TF2	Q + L TF1/TF2
		15 mm	Q + L TF1/TF2	- ¹⁾
¹⁾ rechnerisch nicht nachgewiesen (Beulsicherheitsnachweis nicht erfüllt)				

Tabelle 58: Gegenüberstellung der aussteifenden Maßnahmen für S355 zur Gewährleistung der Beulsicherheit nach FEM und analytischer Berechnung

Folgende strukturelle Parameter können beim analytischen Nachweis nicht oder nur bedingt erfasst werden:

- Beulfeld stellt keine Rechteckplatte nach DIN 18800-3, sondern ein trapezförmige Fläche dar. Somit sind die Beulfeldabmessungen nicht eindeutig geregelt. Um nicht die maximale Steghöhe anzusetzen, wurde eine idealisierte Beulfeldhöhe nach Abbildung 58 zugrunde gelegt.
- Die einwirkenden Randspannungen sind nicht wie in der Norm geregelt gegen gleich, sondern die Größe der Spannungen ist für den linken und rechten Beulfeldrand unterschiedlich.
- Die Verminderung des Querschnitts (Schnitt Druckgurt/Zuglasche), sowie die Aufdickungen im Obergurt und die damit unterschiedlichen Spannungsverhältnisse im betrachteten Gesamt- oder Teilfeld können nicht berücksichtigt werden. Durch interpolieren der Beulwerte (Ergebnis INW) über das Verhältnisse der Aufdickungslänge im betrachteten Gesamt- oder Teilfeld wurde zumindest eine gewissen Anpassung erreicht.
- Die teilweise Begrenzung der Beulfeldhöhe durch die Zuglasche blieb analytisch unberücksichtigt.

Diese Gründe führen grundsätzlich dazu, dass die analytisch ermittelten Beulwerte ungünstiger ausfallen und somit bei den unterschiedlichen Varianten vorzeitig konstruktive Maßnahmen eingeleitet werden müssen. Somit liegen die analytisch ermittelten Ergebnisse auf der sicheren Seite.

Biegedrillknicknachweis

Hinsichtlich des Biegedrillknicknachweises ist zunächst zu erwähnen, dass nach beiden Nachweisformen dieser nicht bemessungsrelevant ist und somit keine konstruktiven Forderungen entstehen. Im FEM wurde Biegedrillknicken nur für große und damit nicht beulgefährdete Stegdicken als erste Eigenform angezeigt, wobei die dazugehörigen Verzweigungslastfaktoren deutlich oberhalb der kritischen Grenze lagen. Für die analytische Berechnung war ein vereinfachter Biegedrillknicknachweis, mit dem Druckgurt als Druckstab nach dem Ersatzstabverfahren und dem 3. Eulerschen Fall, ausreichend.

Lokale Verformung am Untergurt

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit der lokalen Verformung am Untergurt infolge Außermittigkeit des Verschublaggers von 10mm ergab erhebliche Unterschiede. Dabei werden die FE-Ergebnisse als realistischer angesehen. Ein großes Problem des analytischen Nachweises war es, ein geeignetes statisches Modell zu finden, welches die Randbedingungen sinnvoll erfasst. Selbst das letztendlich aufwendig erstellte Stabwerksmodell erfasst nur die Biegung im Stegblech infolge Außermittigkeit, jedoch kaum die Flanschverformung. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt diese Unterschiede auf.

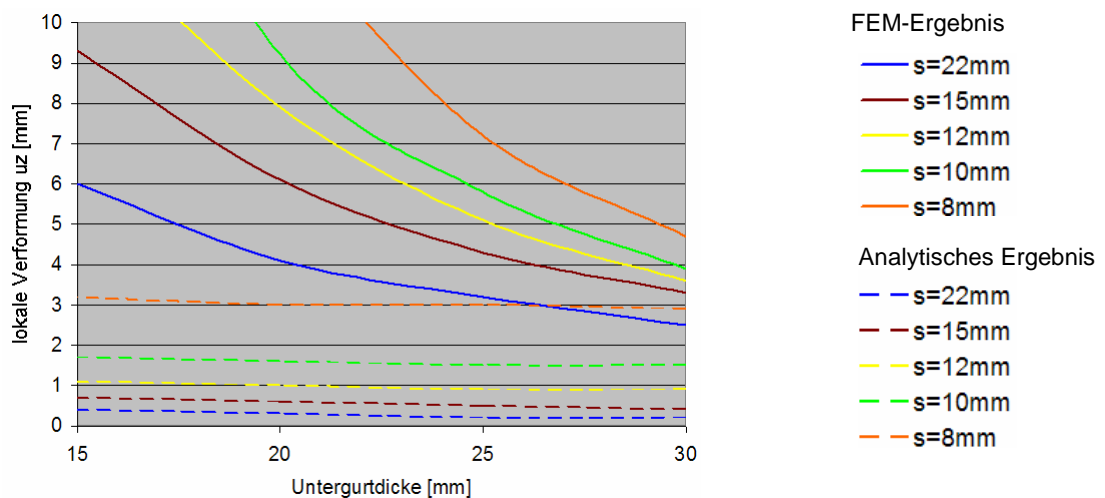


Diagramm 72: Vergleich FEM-Ergebnis mit analytischem Ergebnis anhand der lokalen Verformung des Untergurts an der Stelle $x=7,5m$

Es zeigt sich deutlich, dass die Flanschbiegung nach der FEM-Methode die Verformungswerte steil ansteigen lässt. Hingegen bei der analytischen Berechnung ist dieser Effekt kaum spürbar. Die Nichterfassung der Flanschbiegung gilt daher als der zentrale Punkt für die großen Differenzen. Darüber hinaus liegen die Anteile aus Stegbiegung rund 2mm unterhalb der FEM-Ergebnisse (siehe $t_{UG}=30mm$, da bei dieser Dicke der Anteil der Flanschbiegung sehr gering ist).

Aus diesen Erkenntnissen erscheint eine analytische Bestimmung dieses Problemfalles als ungeeignet.

Vor- und Nachteile der Nachweismethoden

Vorteil FEM

- Erfassung der Bauteilstruktur als Ganzes, dadurch bilden sich Kraftverläufe bei Steifigkeitsunterschieden besser ab
- Kritische Stellen hinsichtlich Spannung und Stabilität lassen sich sofort erkennen, besonders bei komplizierter Bauteilgeometrie und mehrachsigen Spannungszuständen hilfreich.
- Für lokale Spannungs-, Stabilitäts- und Verformungsprobleme liefert FEM genauere Ergebnisse.

Nachteil FEM

Fehlerquellen hinsichtlich Modellierung und Auswertung

- Elementansatz
- Netzgenerierung
- Materialgesetz
- Lagerungsbedingung
- Lasteinleitung
- Umgang mit Spannungsspitzen/Spannungskonzentrationen

Weiterer Nachteil ist:

- lange Rechenzeiten bei großen Strukturen

Vorteil analytische Berechnung

- Schnellere und weniger fehleranfällige Ergebnisermittlung
- Bei Standardnachweisen mit umfangreichen Berechnungsläufen können die Ergebnisse mittels EDV (z.B. MS Excel) sehr schnell ermittelt werden.

Nachteil analytische Berechnung

- Die Randbedingungen für lokale Spannungs- und Verformungsprobleme können nur unzureichend erfasst werden oder die Ergebnisse liegend stark auf der sicheren Seite.
- Nicht eindeutige Nachweisführung bei Problemen, die von den normativen Vorgaben abweichen

Resümee

Für einfache statische Systeme, sowie einfache Spannungs- und Stabilitätsprobleme lohnt der Einsatz von FEM aufgrund der genannten Fehlerquellen nicht. Je komplizierter die Bauteilgeometrie und die dadurch zu erfassenden Randbedingungen werden, desto ungenauer wird die analytische Erfassung des Problems und FEM liefert genauere Ergebnisse. Gleiches gilt für lokale Spannung- und Verformungsprobleme. Hierbei wurden teils erhebliche Unterschiede festgestellt, wobei die Handrechenergebnisse als die ungenaueren angesehen werden müssen.

10 Resümee

Am vorliegenden Beispiel der Vorbauschabelkonstruktion für die Eisenbahnüberführung Stör hat die Variantenuntersuchung zahlreiche konstruktive Unterschiede ergeben. Dies wirkt sich zum einen auf den Materialeinsatz und damit auf die Materialkosten und zum anderen auf die Fertigungszeiten und damit auf die Fertigungskosten teils erheblich aus. Da sich Material- und Fertigungskosten jedoch gegenläufig entwickeln, fallen die Unterschiede in der Summe zwischen den Varianten geringer aus. Im Hinblick auf größere Vorbauschabelkonstruktionen, die als geschweißte Vollwandträger gefertigt werden und bezüglich des Materialverbrauchs oder der Fertigungszeit optimiert werden müssen, ist eine Variantenuntersuchung durchaus sinnvoll.

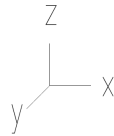
Hinsichtlich der beiden Berechnungsmethoden konnte festgestellt werden, dass die FE-Berechnung die Gesamtstruktur und damit die Randbedingungen genauer erfasst und somit vor allem lokale Spannungs-, Stabilitäts- und Verformungsprobleme genauer beschreibt. Die Ergebnisse des FEM für die Bemessung des Vorbauschabels werden somit als maßgebend angesehen. Bei der analytischen Berechnung war eine Erfassung aller Randbedingungen bei bestimmten Nachweisstellen entweder schlecht oder gar nicht möglich. Somit kamen teils große Abweichungen zustande. Für einfache sowie genormte Spannungs- und Stabilitätsprobleme ist die Handrechnung dennoch sinnvoll und der FE-Berechnung aufgrund der Vielzahl an Einstellungsparametern vorzuziehen.

Anhang A

Ein- und Ausgabewerte Stabwerksprogramm

A 1 Ein- und Ausgabewerte zur Ermittlung der Auflagerreaktionen

Koordinatensystem:



A 1.1 Eingabe Lastfälle

• Statisches System

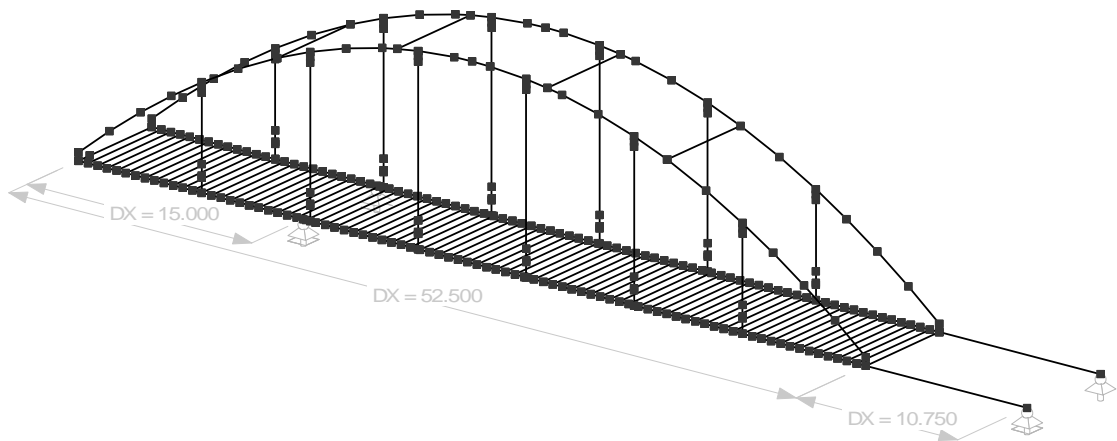


Abbildung 107: Statisches System zur Bestimmung der Auflagerreaktion, Fall 1

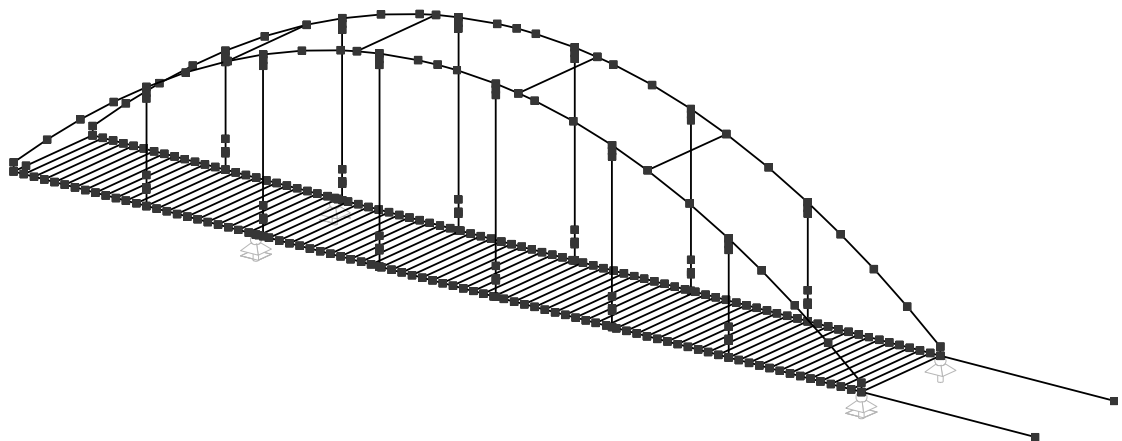


Abbildung 108: Statisches System zur Bestimmung der Auflagerreaktion, Fall 2

Die Differenz der Maße zwischen Vershubkonzept und statischem Modell resultieren daraus, dass sich das statische Modell auf die Systemmaße bezieht, die Maße im Vershubkonzept (Kapitel 3.2) jedoch auf die tatsächliche Brückengeometrie.

• Lastfall 3: Hängeraussteifung

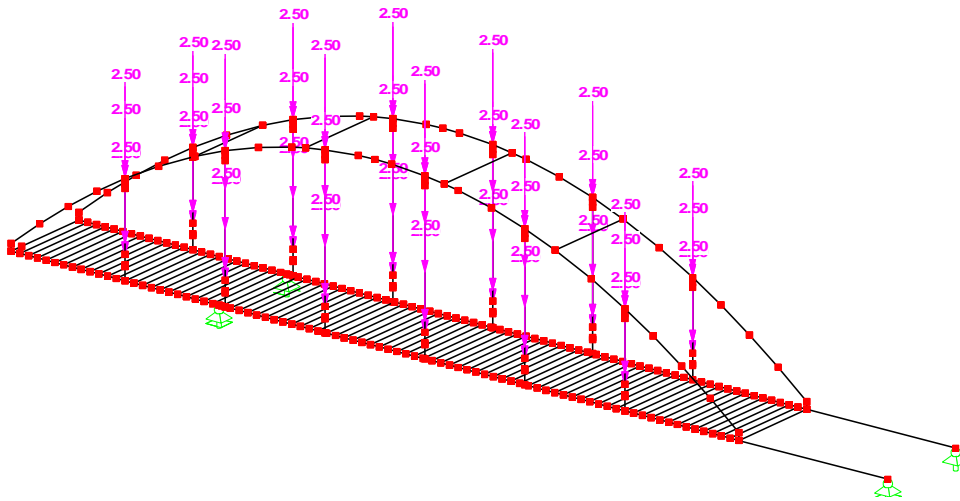


Abbildung 111: Lastfall Hängeraussteifung

• Lastfall 4: Wind auf Brückenkonstruktion

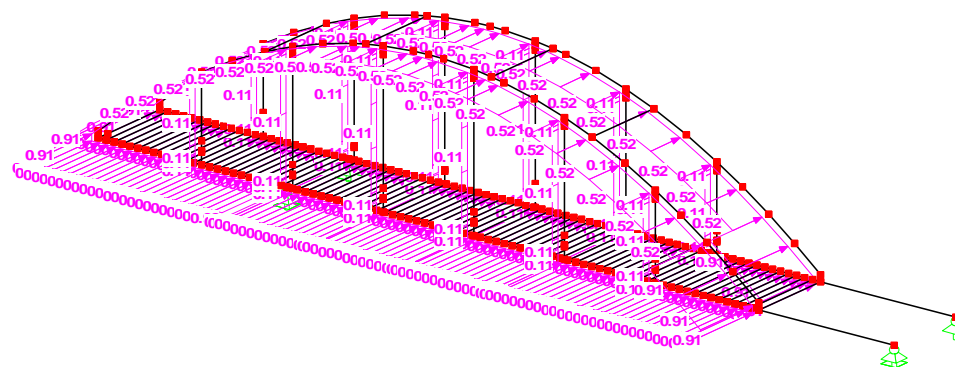


Abbildung 112: Lastfall Wind auf Brückenkonstruktion

• Lastfall 5: Wind auf Vorbauschnabel

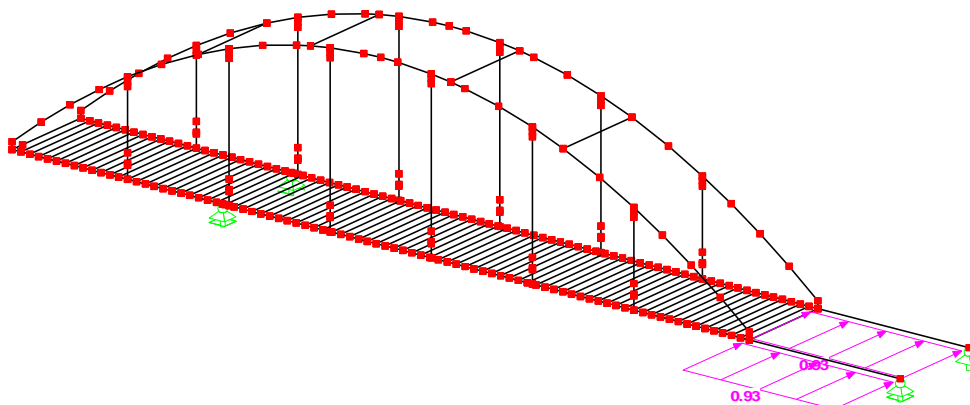


Abbildung 113: Lastfall Wind auf Vorbauschnabel

• Lastfall 6: Baustellenverkehr

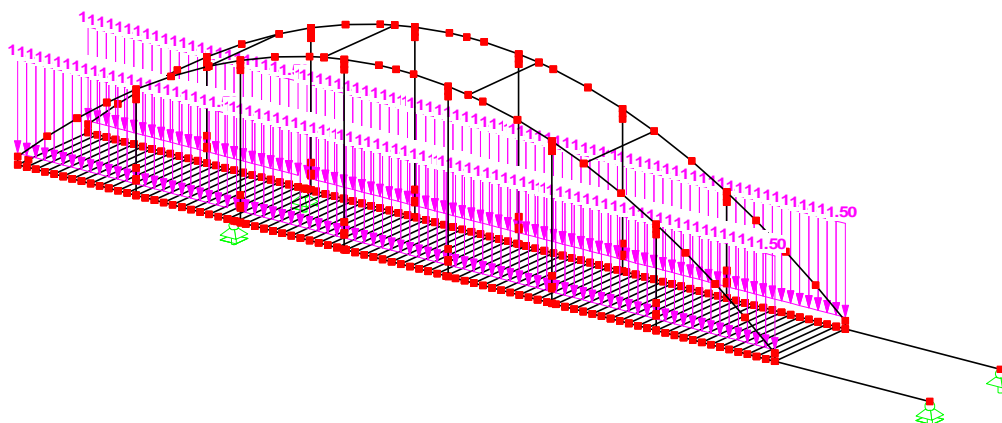


Abbildung 114: Lastfall Baustellenverkehr

• Lastfall 7: Ballastieren

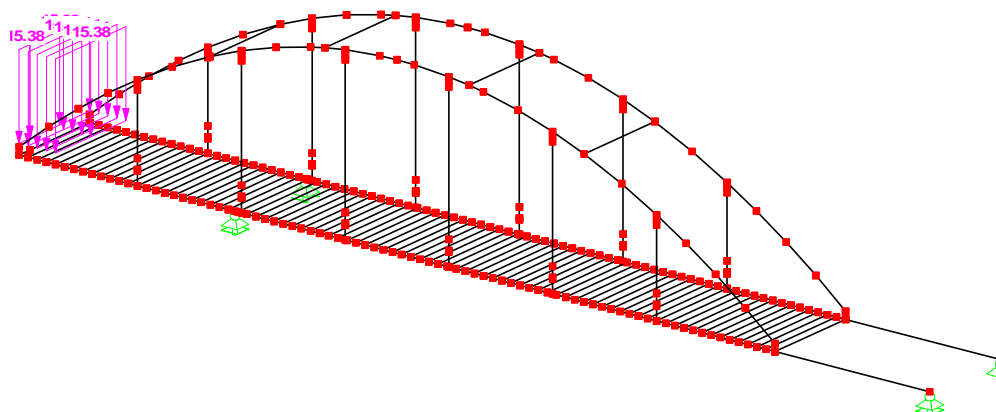


Abbildung 115: Lastfall Ballastieren

A 1.2 Lastfallkombinationen

Für Tragsicherheitsnachweis:

$$\text{LK1: } (LF1+LF2+LF3+LF7) \cdot 1,35 + (LF4+LF5+LF6) \cdot 1,5$$

Von einer Abminderung der veränderlichen Last mit 0,9 wird abgesehen, da die Last aus Wind und Baustellenverkehr in unterschiedlichen Achsen angreift und somit auch unabhängige Lagerreaktionen hervorruft.

Für Gebrauchstauglichkeitsnachweis:

$$\text{LK2: } (LF1+LK2+LF3+LF4+LF5+LF6+LF7) \cdot 1,0$$

A 1.3 Ausgabewerte der Lagerreaktionen

Die Ausgabewerte erfolgen getrennt für die jeweiligen Varianten und für die beiden unterschiedlichen Statischen Systeme.

Lagerreaktionen zum Nachweis der Tragsicherheit

- Eigengewicht VBS mit 4,0 kN/m

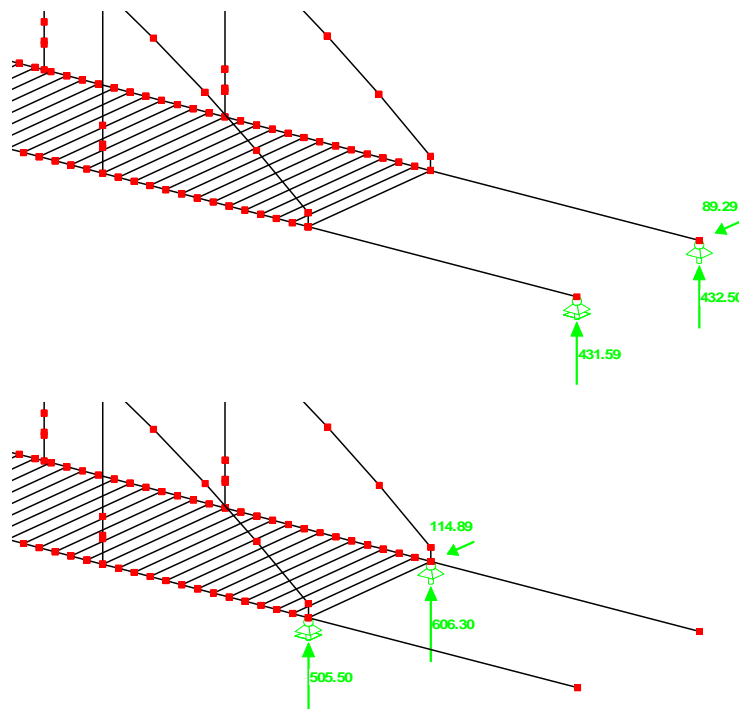


Abbildung 116: Lagerreaktionen am Vorbauschubel für 4,0kN/m zum Nachweis GZT

• Eigengewicht VBS mit 4,5 kN/m

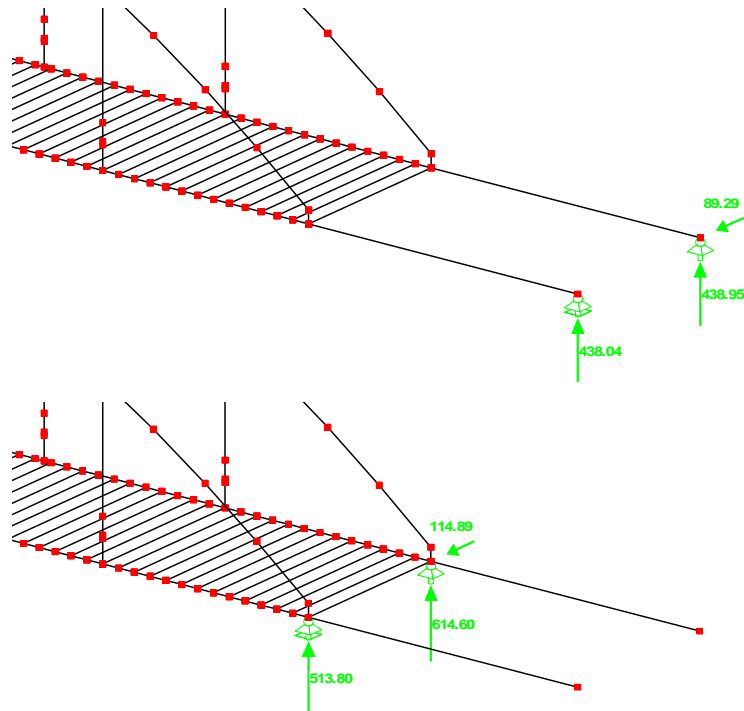


Abbildung 117: Lagerreaktion am Vorbauschnabel für 4,5kN/m zum Nachweis GZT

• Eigengewicht VBS mit 5,0 kN/m

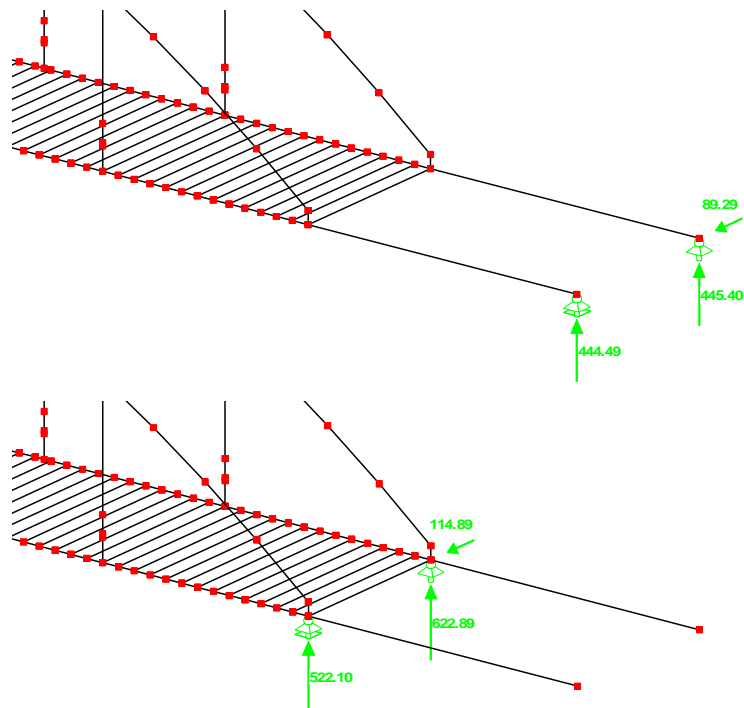


Abbildung 118: Lagerreaktion am Vorbauschnabel für 5,0kN/m zum Nachweis GZT

- Eigengewicht VBS mit 5,5 kN/m

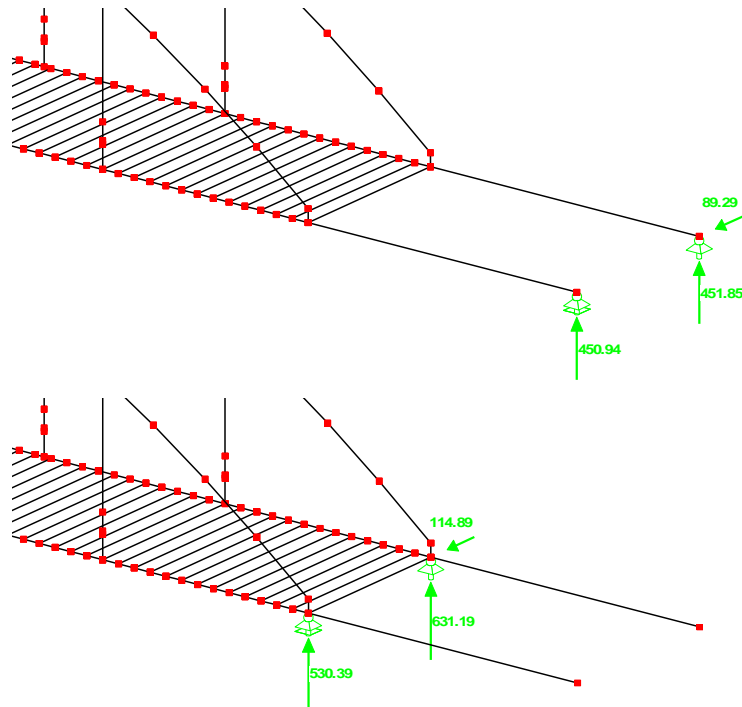


Abbildung 119: Lagerreaktion am Vorbauschnabel für 5,5kN/m zum Nachweis GZT

Lagerreaktionen zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

- Eigengewicht VBS mit 4,0 kN/m

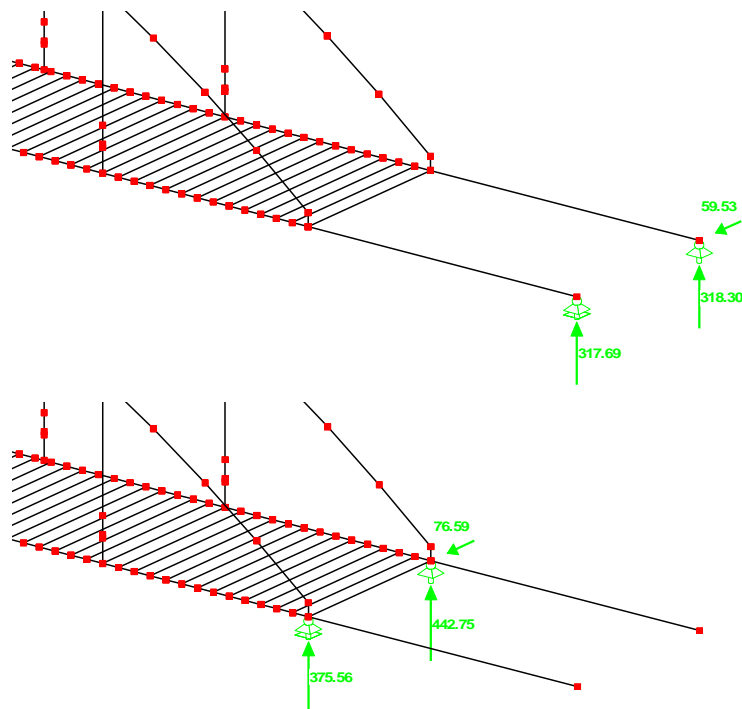


Abbildung 120: Lagerreaktion am Vorbauschabel für 4,0kN/m zum Nachweis GZG

- Eigengewicht VBS mit 4,5 kN/m

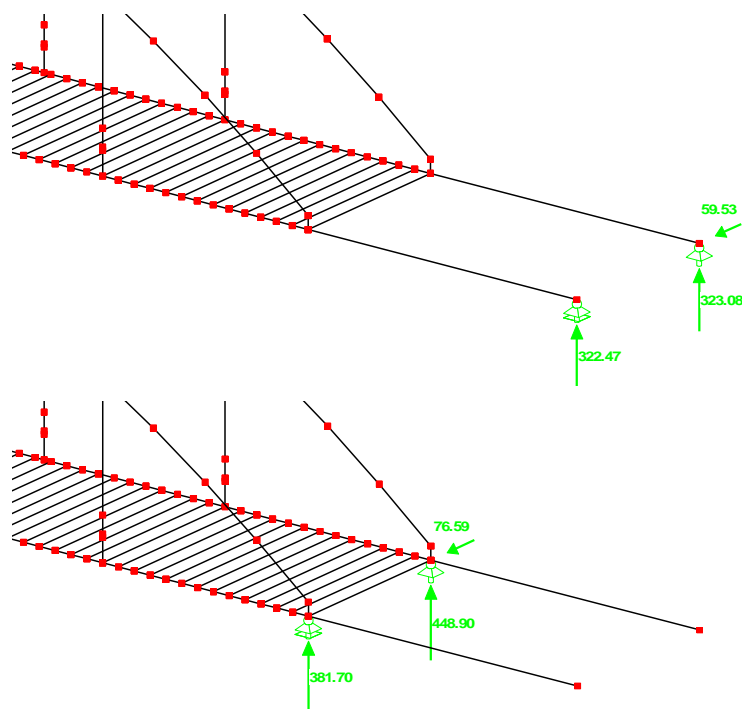


Abbildung 121: Lagerreaktion am Vorbauschabel für 4,5kN/m zum Nachweis GZG

• Eigengewicht VBS mit 5,0 kN/m

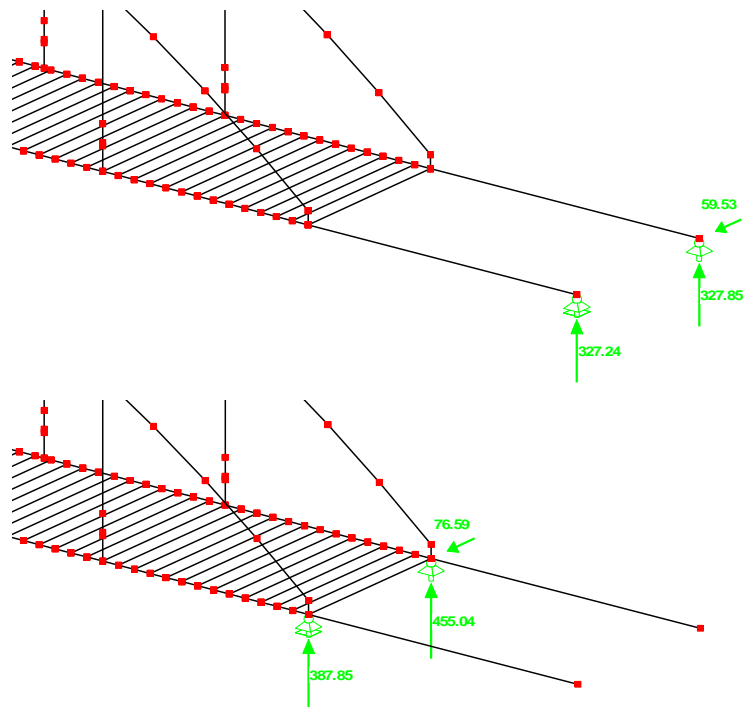


Abbildung 122: Lagerreaktion am Vorbauschabel für 5,0kN/m zum Nachweis GZG

• Eigengewicht VBS mit 5,5 kN/m

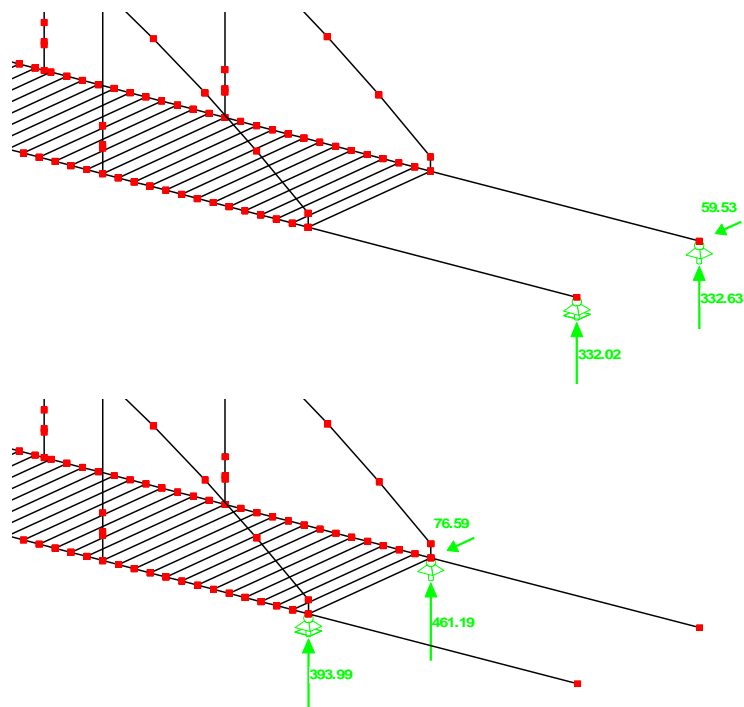


Abbildung 123: Lagerreaktion am Vorbauschabel für 5,5kN/m zum Nachweis GZG

A 2 Ein- und Ausgabewerte zur Ermittlung der Schnittkräfte am Vorbauschubel

A 2.1 Einwirkungen Hauptträger zur analytischen Berechnung

Die Eingabe der Werte für die Auflagerreaktionen erfolgt als Bemessungslasten, da die Sicherheiten bereits bei der Ermittlung der Auflagerreaktionen berücksichtigt wurden. Zusätzlich werden Exzentrizität und Vorkrümmung berücksichtigt.

EG VBS [kN/m]	$F_{x1,d,x=0}$ [kN]	$F_{x1,d,x=10}$ [kN]	$F_{y1,d,x=0}$ [kN]	$F_{y1,d,x=10}$ [kN]	$F_{z1,d,x=0}$ [kN]	$F_{z1,d,x=10}$ [kN]
4,0	22	31	90	115	432	606
4,5	22	31	90	115	439	615
5,0	22	31	90	115	446	623
5,5	23	32	90	115	452	632

Tabelle 59: Schnittkräfte Hauptträger 1 für Tragsicherheitsnachweis

EG VBS [kN/m]	$F_{x1,d,x=0}$ [kN]	$F_{x1,d,x=10}$ [kN]	$F_{y1,d,x=0}$ [kN]	$F_{y1,d,x=10}$ [kN]	$F_{z1,d,x=0}$ [kN]	$F_{z1,d,x=10}$ [kN]
4,0	22	26	0	0	432	505
4,5	22	26	0	0	438	513
5,0	22	26	0	0	445	522
5,5	23	27	0	0	451	530

Tabelle 60: Schnittkräfte Hauptträger 2 für Tragsicherheitsnachweis

EG VBS [kN/m]	$F_{x1,d,x=0}$ [kN]	$F_{x1,d,x=10}$ [kN]	$F_{y1,d,x=0}$ [kN]	$F_{y1,d,x=10}$ [kN]	$F_{z1,d,x=0}$ [kN]	$F_{z1,d,x=10}$ [kN]
4,0	20	22	60	77	318	443
4,5	20	23	60	77	323	449
5,0	20	23	60	77	327	455
5,5	20	23	60	77	333	462

Tabelle 61: Schnittkräfte Hauptträger 1 für Gebrauchstauglichkeitsnachweis

EG VBS [kN/m]	$F_{x1,d,x=0}$ [kN]	$F_{x1,d,x=10}$ [kN]	$F_{y1,d,x=0}$ [kN]	$F_{y1,d,x=10}$ [kN]	$F_{z1,d,x=0}$ [kN]	$F_{z1,d,x=10}$ [kN]
4,0	16	20	0	0	318	376
4,5	16	20	0	0	323	382
5,0	16	20	0	0	327	388
5,5	16	20	0	0	333	394

Tabelle 62: Schnittkräfte Hauptträger 2 für Gebrauchstauglichkeitsnachweis

• Stabwerksmodell zur analytischen Berechnung

Zur Berücksichtigung des Einflusses der Verformung nach Theorie II.Ordnung ist dem Stabwerksmodell eine Imperfektion in Form einer Schiefstellung zuzuordnen.

$$\varphi_o = \frac{1}{200} \cdot r_1 \cdot r_2$$

$$r_1 = \sqrt{\frac{5}{I}} = \sqrt{\frac{5}{10}} = 0,707$$

$$r_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{1}{n}}\right) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{1}{1}}\right) = 0,5$$

$$\varphi_o = \frac{1}{200} \cdot 0,5 \cdot 0,707 = 0,0018$$

$$\frac{1}{\varphi_o} = \frac{1}{0,0018} \hat{=} \frac{I}{565}$$

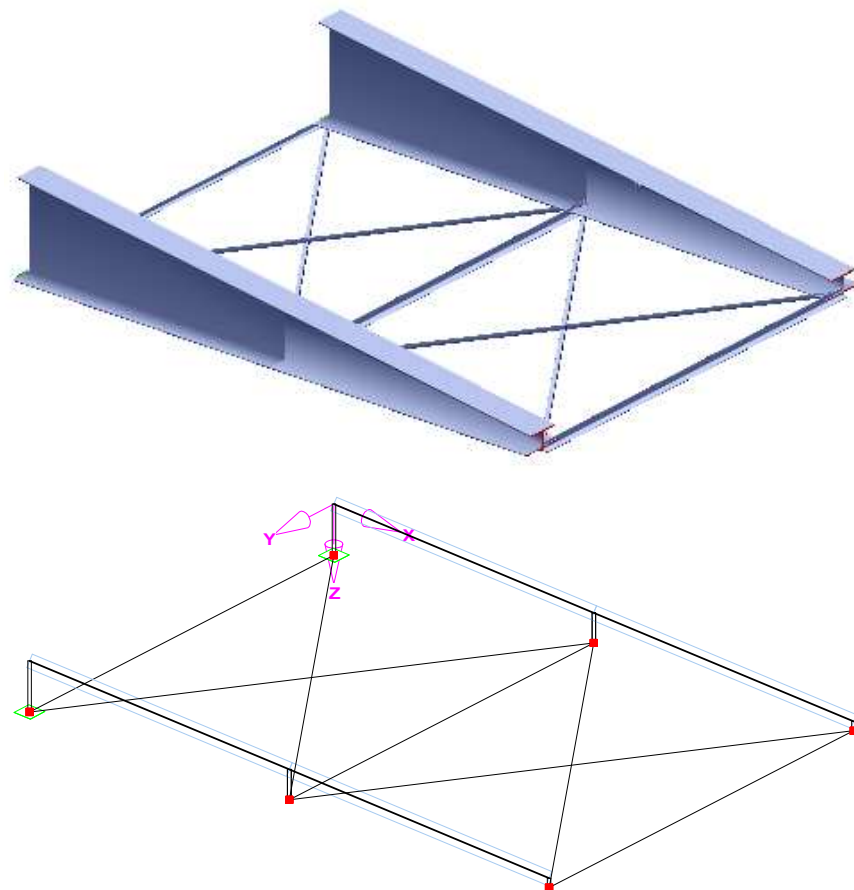


Abbildung 124: Stabwerksmodell zur analytischen Berechnung

A 2.2 Einwirkungen Hauptträger für FE-Berechnung

Um Spannungsspitzen in der Nachweisführung mittels FEM zu vermeiden, werden die Einwirkungen nicht als Punktlasten, sondern entsprechend der Größe des Verschublagere sowie des Wälzgerüsts angesetzt. Die Lastverteilung ist für jede Achse wie folgt definiert:

- x-Achse: 160mm
- y-Achse: 300mm
- z-Achse: 160mm x 420mm

Bezogen auf die jeweiligen Längen und Flächen sind die Eingabewerte in der nachfolgenden Tabelle für verschiedene Lastfälle angegeben. Die Ausgangsdaten dafür können dem vorherigen Abschnitt entnommen werden.

EG VBS	Belastungs- richtung	Laststellung x [m]						Einheit
		x=0	x=2,5	x=5,0	x=6,5	x=7,5	x=9,79	
4,0 kN/m	x-Achse	137	152	165	174	180	193	kN/m
	y-Achse	300	320	341	354	362	382	kN/m
	z-Achse	6429	7076	7723	8111	8370	8963	kN/m ²
4,5 kN/m	x-Achse	137	152	165	174	180	193	kN/m
	y-Achse	300	320	341	354	362	382	kN/m
	z-Achse	6532	7187	7842	8235	8497	9096	kN/m ²
5,0 kN/m	x-Achse	137	152	165	174	180	193	kN/m
	y-Achse	300	320	341	354	362	382	kN/m
	z-Achse	6637	7295	7953	8349	8612	9215	kN/m ²
5,5 kN/m	x-Achse	144	157	172	174	185	199	kN/m
	y-Achse	300	320	341	354	362	382	kN/m
	z-Achse	6726	7396	8065	8467	8735	9348	kN/m ²

Tabelle 63: Eingabewerte FEM zum Nachweis im GZT für Hauptträger 1

EG VBS	Belastungs- richtung	Laststellung x [m]						Einheit
		x=0	x=2,5	x=5,0	x=6,5	x=7,5	x=9,79	
4,0 kN/m	x-Achse	137	144	150	154	156	162	kN/m
	y-Achse	0	0	0	0	0	0	kN/m
	z-Achse	6429	6700	6972	7135	7243	7492	kN/m ²
4,5 kN/m	x-Achse	137	144	150	154	156	162	kN/m
	y-Achse	0	0	0	0	0	0	kN/m
	z-Achse	6532	6797	7076	7243	7355	7610	kN/m ²
5,0 kN/m	x-Achse	137	144	150	154	156	162	kN/m
	y-Achse	0	0	0	0	0	0	kN/m
	z-Achse	6637	6908	7195	7367	7482	7744	kN/m ²
5,5 kN/m	x-Achse	144	145	154	158	161	169	kN/m
	y-Achse	0	0	0	0	0	0	kN/m
	z-Achse	6726	7005	7300	7475	7593	7862	kN/m ²

Tabelle 64: Eingabewerte FEM zum Nachweis im GZT für Hauptträger 2

EG VBS	Belastungs- richtung	Laststellung x [m]						Einheit
		x=0	x=2,5	x=5,0	x=6,5	x=7,5	x=9,79	
4,0 kN/m	x-Achse	125	129	132	134	135	138	kN/m
	y-Achse	200	215	230	237	245	260	kN/m
	z-Achse	4732	5198	5662	5941	6127	6553	kN/m ²
4,5 kN/m	x-Achse	125	129	132	134	135	138	kN/m
	y-Achse	200	215	230	237	245	260	kN/m
	z-Achse	4807	5275	5744	6025	6213	6642	kN/m ²
5,0 kN/m	x-Achse	125	129	132	134	135	138	kN/m
	y-Achse	200	215	230	237	245	260	kN/m
	z-Achse	4866	5342	5818	6104	6295	6730	kN/m ²
5,5 kN/m	x-Achse	125	129	132	134	135	138	kN/m
	y-Achse	200	215	230	237	245	260	kN/m
	z-Achse	4955	5435	5916	6203	6395	6834	kN/m ²

Tabelle 65: Eingabewerte FEM zum Nachweis im GZG für Hauptträger 1

EG VBS	Belastungs- richtung	Laststellung x [m]						Einheit
		x=0	x=2,5	x=5,0	x=6,5	x=7,5	x=9,79	
4,0 kN/m	x-Achse	100	107	113	117	119	125	kN/m
	y-Achse	0	0	0	0	0	0	kN/m
	z-Achse	4732	4948	5164	5293	5379	5577	kN/m ²
4,5 kN/m	x-Achse	100	107	113	117	119	125	kN/m
	y-Achse	0	0	0	0	0	0	kN/m
	z-Achse	4807	5026	5245	5377	5465	5666	kN/m ²
5,0 kN/m	x-Achse	100	107	113	117	119	125	kN/m
	y-Achse	0	0	0	0	0	0	kN/m
	z-Achse	4866	5093	5320	5456	5546	5754	kN/m ²
5,5 kN/m	x-Achse	100	107	113	117	119	125	kN/m
	y-Achse	0	0	0	0	0	0	kN/m
	z-Achse	4955	5183	5409	5546	5636	5844	kN/m ²

Tabelle 66: Eingabewerte FEM zum Nachweis im GZG für Hauptträger 2

A 2.3 Schnittkräfte der Verbände

Die Ermittlung der Schnittkräfte in den Verbandsfeldern erfolgte im RFEM 4 [29] unter Berücksichtigung der Imperfektionen in Form von Vorkrümmungen nach Theorie II.Ordnung. Die angegebenen Schnittkräfte für das Biegemoment sind bezogen auf die Hauptachsen des Winkelprofils.

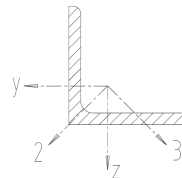


Abbildung 125: Hauptachsen Winkelprofil

• Schnittkräfte für ein Verbandsfeld – Anordnung als K-Verband

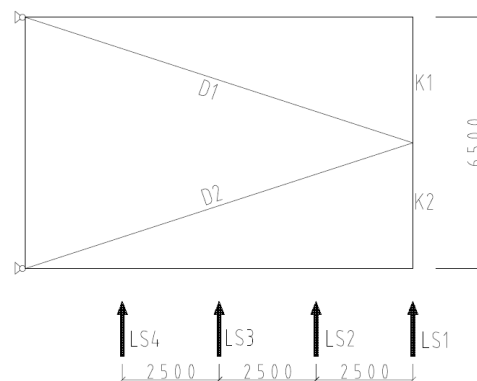


Abbildung 126: Stabbezeichnung bei einem Verbandsfeld als K-Verband

Stabbezeichnung		D 1	D2	K1	K2
Stabtyp		Fachwerk	Fachwerk	Balken	Balken
Stablänge [mm]		10010	10010	3250	3250
LS 1	N [kN]	-134	136	-4	-86
	M ₂ [kNm]	---	---	-5,6	-6,7
	M ₃ [kNm]	---	---	-0,3	-4,98
	M _y [kNm]	7,50	7,50	2,56	2,56
LS 2	N [kN]	-107	106	0	-68
	M ₂ [kNm]	---	---	-4,8	-7,3
	M ₃ [kNm]	---	---	-1,2	-4,5
	M _y [kNm]	7,50	7,50	2,56	2,56
LS 3	N [kN]	-72	72	0	-46
	M ₂ [kNm]	---	---	-3,3	-6,3
	M ₃ [kNm]	---	---	-1,2	-3
	M _y [kNm]	7,50	7,50	2,56	2,56
LS 4	N [kN]	-34	34	0	-2,2
	M ₂ [kNm]	---	---	-1,5	-3,4
	M ₃ [kNm]	---	---	-0,8	-1,5
	M _y [kNm]	7,50	7,50	2,56	2,56

Tabelle 67: Schnittkräfte bei einem Verbandsfeld als K-Verband

• Schnittkräfte für zwei Verbandsfelder – Anordnung als K-Verband

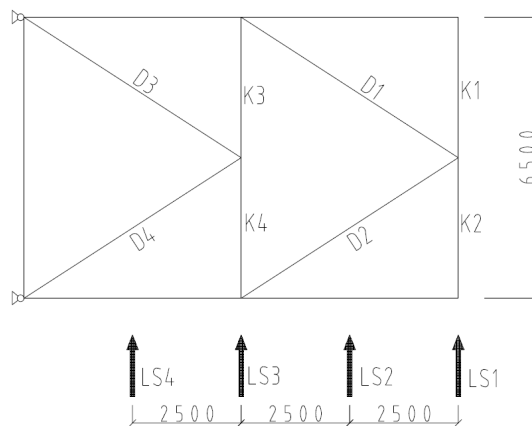


Abbildung 127: Stabbezeichnung bei zwei Verbandsfeldern als K-Verband

Stabbezeichnung		D 1	D2	D3	D4	K1	K2	K3	K4
Stabtyp		FW	FW	FW	FW	B	B	B	B
Stablänge [mm]		5750	5750	5750	5750	3250	3250	3250	3250
LS 1	N [kN]	- 82	81	- 72	72	0	- 83	31	-48
	M ₂ [kNm]	---	---	---	---	- 4,3	- 5,8	3,4	- 3,2
	M ₃ [kNm]	---	---	---	---	-0,6	-2,7	-0,5	0
	M _y [kNm]	0,95	0,95	0,95	0,95	1,25	1,25	1,25	1,25
LS 2	N [kN]	- 43	43	- 81	81	3	- 41	7	- 81
	M ₂ [kNm]	---	---	---	---	-1,8	-3,6	2,7	-2,5
	M ₃ [kNm]	---	---	---	---	0,4	-1,7	0,3	-0,6
	M _y [kNm]	0,95	0,95	0,95	0,95	1,25	1,25	1,25	1,25
LS 3	N [kN]	-10	10	-77	77	5	-5	-11	-95
	M ₂ [kNm]	---	---	---	---	0,6	-1,3	1,9	-2
	M ₃ [kNm]	---	---	---	---	0,3	-0,7	0,8	-1
	M _y [kNm]	0,95	0,95	0,95	0,95	1,25	1,25	1,25	1,25
LS 4	N [kN]	-2	2	-44	44	3	5	-10	-59
	M ₂ [kNm]	---	---	---	---	0	0	1,2	-1,3
	M ₃ [kNm]	---	---	---	---	0	0	0,7	-0,6
	M _y [kNm]	0,95	0,95	0,95	0,95	1,25	1,25	1,25	1,25

Tabelle 68: Schnittkräfte bei zwei Verbandsfeldern als K-Verband

• Schnittkräfte für drei Verbandsfelder – Anordnung als K-Verband

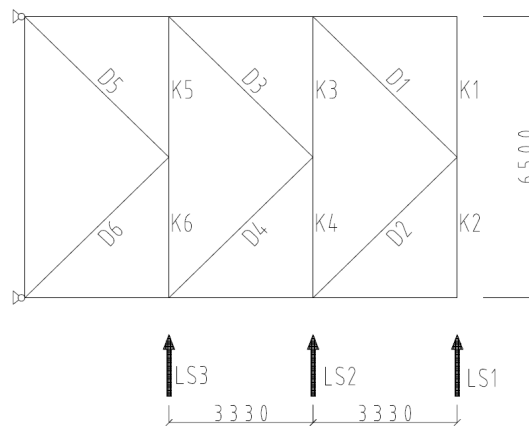


Abbildung 128: Stabbezeichnung bei drei Verbandsfeldern als K-Verband

Stabbezeichnung		D 1	D2	D3	D4	D5	D6
Stabtyp		FW	FW	FW	FW	FW	FW
Stablänge [mm]		4300	4300	4300	4300	4300	4300
LS 1	N [kN]	-61	60	-59	59	-55	55
	M _y [kNm]	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
LS 2	N [kN]	-12	12	-54	54	-64	64
	M _y [kNm]	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
LS 3	N [kN]	0	0	-11	11	-61	61
	M _y [kNm]	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
Stabbezeichnung		K 1	K2	K3	K4	K5	K6
Stabtyp		B	B	B	B	B	B
Stablänge [mm]		3250	3250	3250	3250	3250	3250
LS 1	N [kN]	0	-80	29	-51	41	-35
	M ₂ [kNm]	-4,3	-5,6	1,7	-2	1,8	-1,8
	M ₃ [kNm]	-0,6	-3,2	0	0	0	0
	M _y [kNm]	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
LS 2	N [kN]	7	7	-7	-80	35	-54
	M ₂ [kNm]	-1,3	-2,2	1,3	-1,7	2	-2
	M ₃ [kNm]	0	-1,4	0,4	-0,6	0	0
	M _y [kNm]	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
LS 3	N [kN]	3	2	0	-15	-6	-88
	M ₂ [kNm]	0	0	1	-1	1	-1
	M ₃ [kNm]	0,2	-0,3	0,4	-0,4	-0,4	-0,4
	M _y [kNm]	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25

Tabelle 69: Schnittkräfte bei drei Verbandsfeldern als K-Verband

Schnittkräfte bei der Anordnung der Stäbe als Kreuzverband

Hierbei ist insbesondere das Biegemoment aus Eigengewicht zu berücksichtigen, da ansonsten eine Unterdimensionierung erfolgen würde.

• ein Verbandsfeld

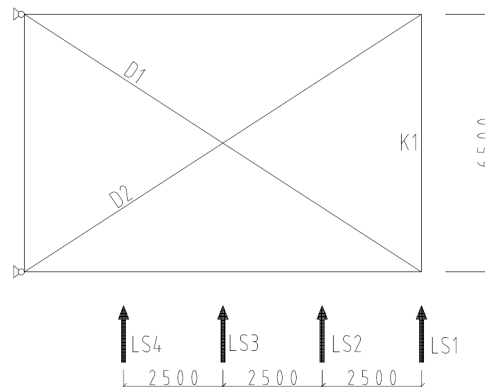


Abbildung 129: Stabbezeichnung bei einem Verbandsfeld als Kreuzverband

Stabbezeichnung		D 1	D2	K1
Stabtyp		Zugstab	Zugstab	Fachwerk
Stablänge [mm]		11930	11930	6500
LS 1	N [kN]	122	0	-76
	M _z [kNm]	2,68	2,68	1,24
LS 2	N [kN]	132,5	0	-72
	M _z [kNm]	2,68	2,68	1,24
LS 3	N [kN]	94	0	-52
	M _z [kNm]	2,68	2,68	1,24
LS 4	N [kN]	50	0	-27
	M _z [kNm]	2,68	2,68	1,24

Tabelle 70: Schnittkräfte bei einem Verbandsfeld als Kreuzverband

• zwei Verbandsfelder

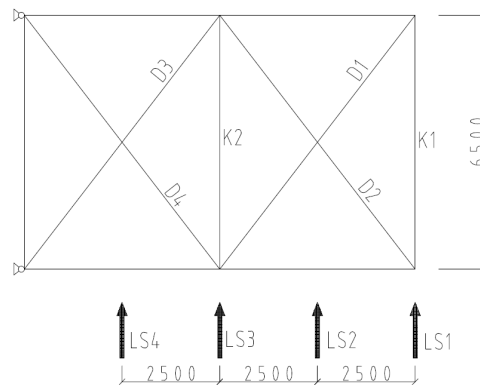


Abbildung 130: Stabbezeichnung bei zwei Verbandsfeldern als Kreuzverband

Stabbezeichnung		D 1	D 2	D 3	D 4	K 1	K 2
Stabtyp		Zugstab	Zugstab	Zugstab	Zugstab	FW	FW
Stablänge [mm]		8200	8200	8200	8200	6500	6500
LS 1	N [kN]	112	0	112	0	-90	-89
	M _z [kNm]	0,81	0,81	0,81	0,81	1,24	1,24
LS 2	N [kN]	52	0	128	0	-41	-105
	M _z [kNm]	0,81	0,81	0,81	0,81	1,24	1,24
LS 3	N [kN]	5	0	121	0	0	-100
	M _z [kNm]	0,81	0,81	0,81	0,81	1,24	1,24
LS 4	N [kN]	0	0	74	0	0	-68
	M _z [kNm]	0,81	0,81	0,81	0,81	1,24	1,24

Tabelle 71: Schnittkräfte bei zwei Verbandsfeldern als Kreuzverband

• drei Verbandsfelder

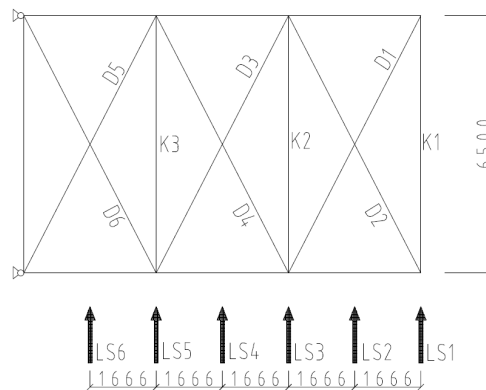


Abbildung 131: Stabbezeichnung bei drei Verbandsfeldern als Kreuzverband

Stabbezeichnung		D 1	D2	D3	D4	D5	D6
Stabtyp		Zugstab	Zugstab	Zugstab	Zugstab	Zugstab	Zugstab
Stablänge [mm]		7175	7175	7175	7175	7175	7175
LS 1	N [kN]	101	0	98	0	102	0
	M _z [kNm]	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
LS 2	N [kN]	51	0	105	0	107	0
	M _z [kNm]	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
LS 3	N [kN]	13	0	93	0	113	0
	M _z [kNm]	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
LS 4	N [kN]	0	0	52	0	119	0
	M _z [kNm]	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
LS 5	N [kN]	0	0	9	0	106	0
	M _z [kNm]	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
LS 6	N [kN]	0	0	0	0	61	0
	M _z [kNm]	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
Stabbezeichnung		K 1		K2		K3	
Stabtyp		Fachwerk		Fachwerk		Fachwerk	
Stablänge [mm]		6500		6500		6500	
LS 1	N [kN]	-89,6		-91		-86	
	M _z [kNm]	1,24		1,24		1,24	
LS 2	N [kN]	-42,6		-102,6		-86,4	
	M _z [kNm]	1,24		1,24		1,24	
LS 3	N [kN]	0		-95,2		-91	
	M _z [kNm]	1,24		1,24		1,24	
LS 4	N [kN]	0		-56,4		-101	
	M _z [kNm]	1,24		1,24		1,24	
LS 5	N [kN]	0		-13		-95	
	M _z [kNm]	1,24		1,24		1,24	
LS 6	N [kN]	0		0		-59	
	M _z [kNm]	1,24		1,24		1,24	

Tabelle 72: Schnittkräfte bei drei Verbandsfeldern als Kreuzverband

Die Schnittkräfte beziehen sich nur auf die 2. Verbandsebene an der Schnabelspitze.
 Als maßgebende Laststellung wird die Stelle $x=0\text{m}$ betrachtet.

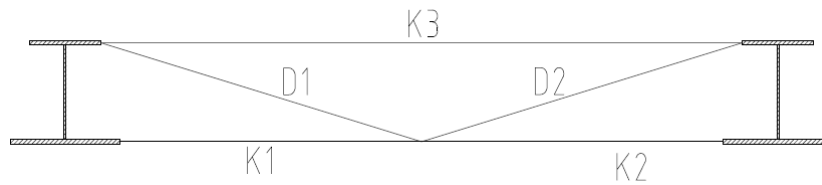


Abbildung 132: Stabbezeichnung der zweiten Verbandsebene an der Schnabelspitze

Stabbezeichnung		K3	K1	K2	D1	D2
Stabtyp		FW	FW	FW	FW	FW
Stablänge [mm]		6500	3250	3250	3080	3080
LS 1	N [kN]	13	-95	-79	-15	1
	M_y [kNm]	0,39	0,96	0,96	0,08	0,08

Tabelle 73: Schnittkräfte der zweiten Verbandsebene an der Schnabelspitze

• Schnittkräfte zur Berechnung der lokalen Spannungen im Untergurt

Der Querkraft und Biegemomentenverlauf wird für die jeweils betrachtete Stelle dargestellt. Die Schnittkräfte wurden mit RStab ermittelt.

• Biegemomentenverlauf M_z im Untergurt bei einem Verbandsfeld

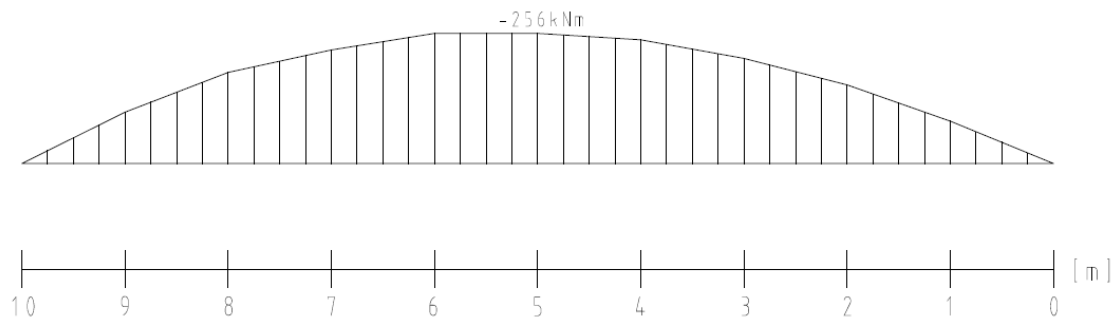


Abbildung 133: Biegemomentenverlauf M_z im Untergurt bei einem Verbandsfeld

Stelle [m]	$M_{z,\max}$ [kNm]	Stelle [m]	$M_{z,\max}$ [kNm]
x = 0	0	x = 6,0	- 252,0
x = 1,0	- 83,3	x = 7,0	- 225,7
x = 2	- 152,0	x = 7,5	- 204,0
x = 2,5	- 180,5	x = 8,0	- 176,0
x = 3,0	- 204,8	x = 9,0	- 101,0
x = 4,0	- 240,0	x = 10,0	0
x = 5,0	- 256,0		

Tabelle 74: Biegemomente M_z im Untergurt bei einem Verbandsfeld

• Biegemomentenverlauf M_z im Untergurt bei zwei Verbandsfeldern

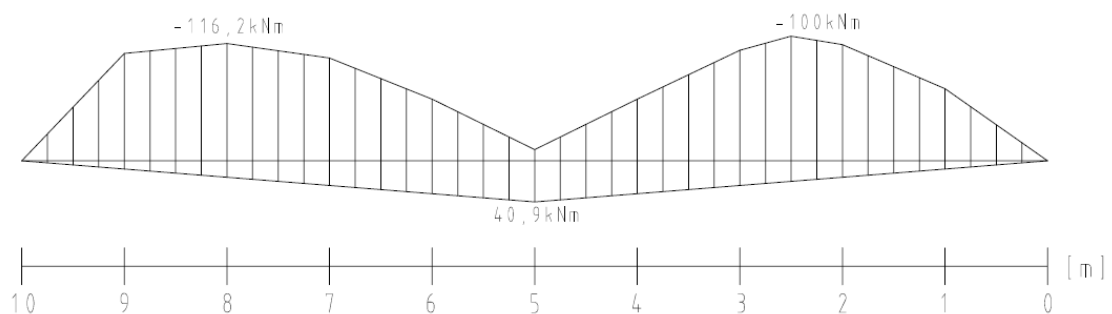


Abbildung 134: Biegemomentenverlauf M_z im Untergurt bei zwei Verbandsfeldern

Stelle [m]	$M_{z,max}$ [kNm]	Stelle [m]	$M_{z,max}$ [kNm]
x = 0	0	x = 6,0	- 62,7
x = 1,0	- 66,8	x = 7,0	- 103,9
x = 2,0	- 98,8	x = 7,5	- 114,0
x = 2,5	- 100,0	x = 8,0	- 116,2
x = 3,0	- 92,9	x = 9,0	- 85,3
x = 4,0	- 59,2	x = 10,0	0
x = 5,0	- 11,8		

Tabelle 75: Biegemomente M_z im Untergurt bei zwei Verbandsfeldern

• Biegemomentenverlauf im Untergurt bei drei Verbandsfeldern

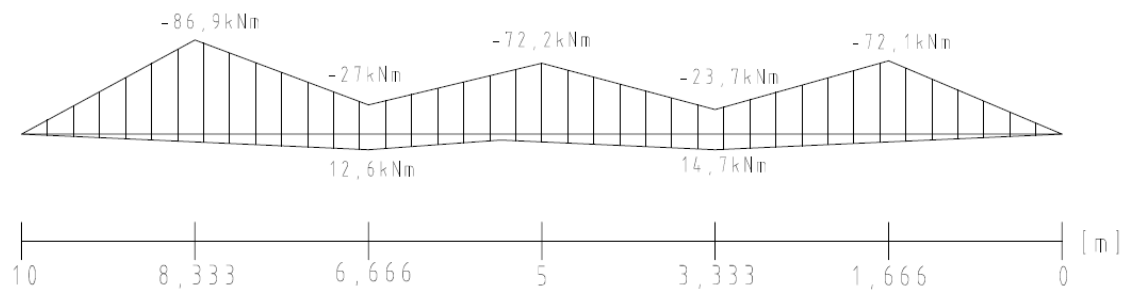


Abbildung 135: Biegemomentenverlauf M_z im Untergurt bei drei Verbandsfeldern

Stelle [m]	$M_{z,max}$ [kNm]	Stelle [m]	$M_{z,max}$ [kNm]
x = 0	0	x = 6,667	-27,0
x = 1,667	- 72,1	x = 8,333	-86,9
x = 3,333	-23,7	x = 10,0	0
x = 5,0	-72,2		

Tabelle 76: Biegemomentenverlauf M_z im Untergurt bei drei Verbandsfeldern

Anhang B

Nachweisführung per Handrechnung

B1 Grenzspannungen für Grundwerkstoff und Schweißverbindungen• Grenznorm- und Grenzscherungsspannung im Grundwerkstoff

$$\sigma_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = \frac{24,0}{1,1} = 21,82 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{für S235, } t \leq 40\text{mm}$$

$$\sigma_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = \frac{21,5}{1,1} = 19,54 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{für S235, } t > 40\text{mm}$$

$$\sigma_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = \frac{36,0}{1,1} = 32,72 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{für S355, } t \leq 40\text{mm}$$

$$\sigma_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = \frac{33,5}{1,1} = 30,45 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{für S355, } t > 40\text{mm}$$

$$\tau_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_M} = \frac{24,0}{\sqrt{3} \cdot 1,1} = 12,60 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{für S235, } t \leq 40\text{mm}$$

$$\tau_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_M} = \frac{21,5}{\sqrt{3} \cdot 1,1} = 11,28 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{für S235, } t > 40\text{mm}$$

$$\tau_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_M} = \frac{36,0}{\sqrt{3} \cdot 1,1} = 18,90 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{für S355, } t \leq 40\text{mm}$$

$$\tau_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_M} = \frac{33,5}{\sqrt{3} \cdot 1,1} = 17,58 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{für S355, } t > 40\text{mm}$$

• Grenzspannung in der Schweißverbindung für $t \leq 40\text{mm}$

$$\sigma_{W,R,d} = \alpha_W \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 1,0 \cdot \frac{24}{1,1} = 21,82 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{für S235; Nahtgüte nachgewiesen}$$

$$\sigma_{W,R,d} = \alpha_W \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 0,95 \cdot \frac{24}{1,1} = 20,73 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{für S235; Nahtgüte nicht nachgewiesen}$$

$$\sigma_{W,R,d} = \alpha_W \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 1,0 \cdot \frac{36}{1,1} = 32,72 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{für S355; Nahtgüte nachgewiesen}$$

$$\sigma_{W,R,d} = \alpha_W \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 0,80 \cdot \frac{36}{1,1} = 26,18 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{für S355; Nahtgüte nicht nachgewiesen}$$

• Grenzspannung in der Schweißverbindung für $t > 40\text{mm}$

$$\sigma_{W,R,d} = \alpha_W \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 1,0 \cdot \frac{21,5}{1,1} = 19,54 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{für S235; Nahtgüte nachgewiesen}$$

$$\sigma_{W,R,d} = \alpha_W \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 0,95 \cdot \frac{21,5}{1,1} = 18,57 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{für S235; Nahtgüte nicht nachgewiesen}$$

$$\sigma_{W,R,d} = \alpha_W \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 1,0 \cdot \frac{33,5}{1,1} = 30,45 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{für S355; Nahtgüte nachgewiesen}$$

$$\sigma_{W,R,d} = \alpha_W \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 0,80 \cdot \frac{33,5}{1,1} = 24,36 \frac{kN}{cm^2} \quad \text{für S355; Nahtgüte nicht nachgewiesen}$$

B2 Zugehörige Berechnungen zu Kapitel 6.2

Die Schnittkräfte der einzelnen Verbandsfelder können dem Anhang A entnommen werden.

	Einheit	Diag.	Koppel.	Diag.	Koppel.	Diag.	Koppel.
		1 Verbandsfeld		2 Verbandsfelder		3 Verbandsfelder	
Profil	-	L200x20	L200x16	L150x10	L130x12	L100x12	L130x12
Stabtyp	-	FW	Balken	FW	Balken	FW	Balken
$N_{max, Druck}$	kN	134	86	82	95	64	88
$M_3 \hat{=} M_{\zeta}$	kNm	-	4,98	-	1,0	-	0,4
M_y	kNm	7,50	2,56	0,95	1,25	0,42	1,25
I_{ζ}	cm ⁴	1170	960	258	194	85,7	194
A	cm ²	76,3	61,8	29,3	30,0	22,7	30,0
S_3	cm ³	65,71	53,89	19,57	16,95	9,78	16,95
I	cm	1001	650	575	650	430	650
s_k	cm	1001	495	575	506	430	500
N_{ki}	kN	242	812	161	157	96,1	161
N_{pl}	kN	1831	1483	703,2	720	544,8	720
$N_{pl,d}$	kN	1664	1348	639,3	655	495	655
$\bar{\lambda}$		2,75	1,35	1,99	2,14	2,38	2,11
KSL	-	c	c	c	c	c	c
κ	-	0,115	0,37	0,20	0,17	0,145	0,18
$N / \kappa \cdot N_{pl,d}$	-	0,70	0,2	0,65	0,85	0,81	0,75
Δn	-	0,02	0,040	0,04	0,017	0,02	0,027
β_m	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$M_{pl,d}$	kNm	28,67	23,49	8,54	7,39	4,26	7,39
Nachweis	-	0,98	0,45	0,80	0,99	0,93	0,99

Tabelle 77: Profilbemessung für K-Verband - Biegeknicknachweis

	Einheit	Diagonalstab	Diagonalstab	Diagonalstab
		1 Verbandsfeld	2 Verbandsfelder	3 Verbandsfelder
Profil	-	L 100x10	L 80x8	L 70x7
Stabtyp	-	Zugstab	Zugstab	Zugstab
N_{max}	kN	132,5	128	119
M_{max}	kNm	2,68	0,81	0,47
A	kNm	19,2	12,3	9,4
W_y	cm ³	24,6	12,6	8,41
σ_{max}	kN/cm ²	17,8	16,8	18,3
$\sigma / \sigma_{R,d}$	-	0,82	0,77	0,84

Tabelle 78: Profilbemessung für Kreuzverband - Spannungsnachweis

	Einheit	Koppelstange	Koppelstange	Koppelstange
		1 Verbandsfeld	2 Verbandsfelder	3 Verbandsfelder
Profil	-	L 120x12	L 130x12	L 130x12
Stabtyp	-	Fachwerk	Fachwerk	Fachwerk
$N_{max,Druck}$	kN	76	105	103
$M_{z,max}$	kNm	1,14	1,24	1,24
I_z	cm ⁴	368	472	472
S_z	cm ³	14,27	16,95	16,95
A	cm ²	27,5	30,0	30,0
I	cm	650	650	650
s_k	cm	650	650	650
N_{ki}	kN	180	231	231
N_{pl}	kN	660	720	720
$N_{pl,d}$	kN	600	654,5	654,5
$\bar{\lambda}$		1,83	1,76	1,76
KSL	-	c	c	c
κ	-	0,23	0,245	0,245
$N / \kappa \cdot N_{pl,d}$	-	0,55	0,65	0,64
Δn	-	0,045	0,043	0,043
β_m	-	1	1	1
$M_{pl,d}$	kNm	6,23	7,39	7,39
Nachweis	-	0,78	0,86	0,86

Tabelle 79: Profilbemessung für Kreuzverband - Biegeknicknachweis

	Einheit	Koppelstange Untergurt	Diagonalstab
Profil	-	L 130x12	L 70x7
Stabtyp	-	Fachwerk	Fachwerk
$N_{max, Druck}$	kN	-95	-15
$M_{z, max}$	kNm	0,96	0,08
I_z	cm ⁴	472	42,3
S_z	cm ³	16,95	2,88
A	cm ²	30,0	9,40
I	cm	650	308
s_k	cm	623	308
N_{ki}	kN	252	92,4
N_{pl}	kN	720	225,6
$N_{pl,d}$	kN	654,5	205,1
$\bar{\lambda}$		1,83	1,56
KSL	-	c	c
κ	-	0,23	0,30
$N / \kappa \cdot N_{pl,d}$	-	0,58	0,25
Δn	-	0,04	0,04
β_m	-	1	1
$M_{pl,d}$	kNm	7,39	1,25
Nachweis	-	0,75	0,354

Tabelle 80: Profilbemessung der zweiten Verbandsebene - Biegeknicknachweis

Bezeichnung	Einheit	Koppelstange Obergurt
		1 Verbandsfeld
Profil	-	L 70x7
Stabtyp	-	Fachwerk
N_{max}	<i>kN</i>	13
M_{max}	<i>kNm</i>	0,39
A	<i>kNm</i>	9,40
W_y	<i>cm³</i>	8,41
σ_{max}	<i>kN/cm²</i>	6,18
$\sigma/\sigma_{R,d}$	-	0,30

Tabelle 81: Profilbemessung der zweiten Verbandsebene - Spannungsnachweis

Berechnung der Spannungen am Untergurt infolge Seitenführungskraft

Berechnungsgrundlage:

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_{UG}}{W_{UG}} \quad \text{Normalspannung aus Biegemoment im Untergurt}$$

$$\text{mit } W_{UG} = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{2 \cdot 70^2}{6} = 1633 \text{ cm}^3; \quad A = b \cdot h = 2 \cdot 70 = 140 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_y = \frac{F_{\text{Seitenführungskraft}}}{t_{UG} \cdot I_{\text{Lasteinleitung}}} \quad \text{aus konzentrierter Lasteinleitung}$$

$$\text{mit } I_{\text{Lasteinleitung}} = 30 \text{ cm und } t_{UG} = 20 \text{ mm}$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y}$$

		Laststellung x=0m	Laststellung x=2,5m	Laststellung x=5,0m	Laststellung x=7,5m	Einheit
	$F_{\text{Seitenführung}}$	90	96	102	109	kN
	N	22	24,3	26,5	28,8	kN
1 Feld	$M_{z,UG}$	0	180,5	256	204	kNm
	σ_x	0,16	11,23	15,86	12,70	kN/cm ²
	σ_y	1,50	1,60	1,70	1,82	kN/cm ²
	σ_v	1,43	10,52	15,08	11,89	kN/cm ²
2 Felder	$M_{z,UG}$	0	100	11,8	103,6	kNm
	σ_x	0,16	6,12	0,73	6,34	kN/cm ²
	σ_y	1,50	1,60	1,70	1,82	kN/cm ²
	σ_v	1,43	5,50	2,18	5,95	kN/cm ²

Tabelle 82: Spannung im Untergurt infolge Seitenführungskraft für 1 und 2 Verbandsfelder

		Laststellung x=0m	Laststellung x=1,66m	Laststellung x=5,0m	Laststellung x=8,33m	Einheit
	$F_{\text{Seitenführung}}$	90	94	102	111	kN
	N	22	23,5	26,5	29,5	kN
3 Feld	$M_{z,UG}$	0	72,1	72,2	86,9	kNm
	σ_x	0,16	4,59	4,61	6,10	kN/cm ²
	σ_y	1,5	1,57	1,70	1,85	kN/cm ²
	σ_v	1,43	4,49	4,04	5,42	kN/cm ²

Tabelle 83: Spannung im Untergurt infolge Seitenführungskraft für 3 Verbandsfelder

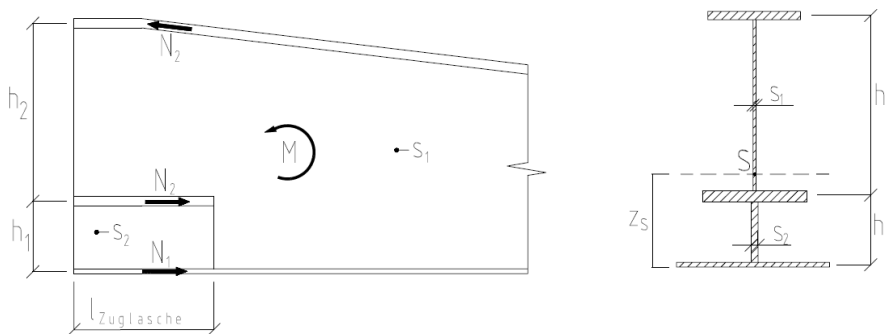
B3 Zugehörige Berechnungen zu Kapitel 6.3.1.1

Erforderliche Stegblechdicke ohne zusätzliche Aussteifung. Als Einwirkungsgröße wird vom ungünstigsten Fall ausgegangen (452kN bei x=0m).

	S 235	S 355	Einheit
s	20	15	mm
h1	42	42	cm
h2	120,5	120,5	cm
M	4520	4520	kNm
N1	2781	2781	kN
N2	3751	3751	kN
ΔN	970	970	kN
T	23,1	23,1	kN
τ	11,55	15,4	kN/cm²
τ / τ_{R,d}	0,92	0,82	-

Tabelle 84: Bestimmung der erforderlichen Stegdicke

Die Bestimmung der Lasteinleitungslänge erfolgt in Abhängigkeit der Steg- und Untergurt-dicke. Maßgebend ist der Vergleichsspannungsnachweis im Bereich der Zuglasche. Die Nachweisführung wird auf Basis folgender Grundlagen geführt:



$$N_1 = \frac{M/2}{(z_S)}; N_2 = \frac{M}{h_2}; \Delta N = N_2 - N_1$$

$$T = \frac{\Delta N}{h_1}; \tau_1 = \frac{T}{s_2} \quad \text{Schubspannung im Blech } s_2$$

$$\tau_2 = \frac{Q}{A_{\text{Steg}}} = \frac{Q}{h_2 \cdot s_1} \quad \text{Schubspannung im Blech } s_1$$

$$\sigma_{x,1} = \frac{N_2/2}{l_{\text{Zuglasche}} \cdot s_2}; \sigma_{x,2} = \frac{N_2/2}{l_{\text{Zuglasche}} \cdot s_1}; \sigma_{v,1} = \sqrt{\sigma_{x,1}^2 + 3 \cdot \tau_1^2}; \sigma_{v,2} = \sqrt{\sigma_{x,2}^2 + 3 \cdot \tau_2^2}$$

Als maßgebende Belastung für den Nachweis wird die Einwirkungsgröße von 439kN an der Schnabelspitze angesetzt. Die Zuglaschenlänge wird analog zum FEM in Schritten zu je 100mm verändert. Zur Bestimmung der Schwerpunktslage z_s wird die Dicke des Obergurts mit 35mm für S 235 und 25mm für S355 definiert.

	$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$	Einheit
$l_{\text{Zuglasche}}$	60	60	70	90	cm
s_2	22	22	22	22	mm
M	4390	4390	4390	4390	kNm
Q	439	439	439	439	kN
h_1	42	42	42	42	cm
z_s	72,71	76,6	80,92	84,01	cm
N_1	3018	2865	2712	2612	kN
N_2	3643	3643	3643	3643	kN
ΔN	625	778	913	1031	kN
T	14,88	18,52	21,73	24,54	kN/cm
τ_1	6,76	8,42	9,87	11,15	kN/cm ²
τ_2	1,66	1,66	1,66	1,66	kN/cm ²
$\sigma_{x,1}$	13,80	13,80	11,83	9,20	kN/cm ²
$\sigma_{x,2}$	13,80	13,80	11,83	9,20	kN/cm ²
$\sigma_{v,1}$	18,10	20,08	20,79	21,40	kN/cm ²
$\sigma_{v,2}$	14,10	14,10	12,20	9,63	kN/cm ²

Tabelle 85: Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für $s=22\text{mm}$ in S235

	$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$	Einheit
$l_{\text{Zuglasche}}$	60	60	70	80	cm
s_2	22	22	22	22	mm
M	4390	4390	4390	4390	kNm
Q	439	439	439	439	kN
h_1	42	42	42	42	cm
z_s	68,42	72,67	78,46	82,87	cm
N_1	3208	3020	2798	2649	kN
N_2	3643	3643	3643	3643	kN
ΔN	435	623	845	994	kN
T	10,36	14,84	20,12	23,67	kN/cm
τ_1	4,71	6,75	9,15	10,76	kN/cm ²
τ_2	2,38	2,38	2,38	2,38	kN/cm ²
$\sigma_{x,1}$	13,80	13,80	11,83	10,35	kN/cm ²
$\sigma_{x,2}$	20,23	20,23	17,35	15,20	kN/cm ²
$\sigma_{v,1}$	16,03	16,03	19,77	21,32	kN/cm ²
$\sigma_{v,2}$	20,64	20,64	17,84	15,75	kN/cm ²

Tabelle 86: Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für $s=15\text{mm}$ in S235

	$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$	Einheit
$l_{Zuglasche}$	80	80	80	90	cm
s_2	22	22	22	22	mm
M	4390	4390	4390	4390	kNm
Q	439	439	439	439	kN
h_1	42	42	42	42	cm
z_s	66,42	70,81	76,79	82,23	cm
N_1	3305	3100	2858	2670	kN
N_2	3643	3643	3643	3643	kN
ΔN	338	543	785	973	kN
T	8,05	12,93	18,70	23,17	kN/cm
r_1	3,66	5,89	8,50	10,54	kN/cm ²
r_2	2,97	2,97	2,97	2,97	kN/cm ²
$\sigma_{x,1}$	10,35	10,35	10,35	9,20	kN/cm ²
$\sigma_{x,2}$	18,97	18,97	18,97	16,86	kN/cm ²
$\sigma_{v,1}$	12,14	14,53	18,00	20,44	kN/cm ²
$\sigma_{v,2}$	19,65	19,65	19,65	17,63	kN/cm ²

Tabelle 87: Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für $s=12\text{mm}$ in S235

	$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$	Einheit
$l_{Zuglasche}$	100	100	100	110	cm
s_2	22	22	22	22	mm
M	4390	4390	4390	4390	kNm
Q	439	439	439	439	kN
h_1	42	42	42	42	cm
z_s	64,95	69,43	74,54	80,43	cm
N_1	3379	3161	2944	2730	kN
N_2	3643	3643	3643	3643	kN
ΔN	264	482	699	913	kN
T	6,28	11,47	16,64	21,74	kN/cm
r_1	2,85	5,21	7,56	9,88	kN/cm ²
r_2	3,56	3,56	3,56	3,56	kN/cm ²
$\sigma_{x,1}$	8,28	8,28	8,28	7,53	kN/cm ²
$\sigma_{x,2}$	18,22	18,22	18,22	16,56	kN/cm ²
$\sigma_{v,1}$	9,64	12,25	15,49	18,69	kN/cm ²
$\sigma_{v,2}$	19,24	19,24	19,24	17,67	kN/cm ²

Tabelle 88: Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für $s=10\text{mm}$ in S235

	$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$	Einheit
$l_{\text{Zuglasche}}$	120	120	120	120	cm
s_2	22	22	22	22	mm
M	4390	4390	4390	4390	kNm
Q	439	439	439	439	kN
h_1	42	42	42	42	cm
z_s	63,35	67,92	73,17	79,26	cm
N_1	3465	3231	3000	2770	kN
N_2	3643	3643	3643	3643	kN
ΔN	178	412	643	873	kN
T	4,24	9,81	15,31	20,79	kN/cm
r_1	1,93	4,46	6,96	9,45	kN/cm ²
r_2	4,46	4,46	4,46	4,46	kN/cm ²
$\sigma_{x,1}$	6,90	6,90	6,90	6,90	kN/cm ²
$\sigma_{x,2}$	18,97	18,97	18,97	18,97	kN/cm ²
$\sigma_{v,1}$	7,67	10,36	13,89	17,77	kN/cm ²
$\sigma_{v,2}$	20,48	20,48	20,48	20,48	kN/cm ²

Tabelle 89: Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für $s=8\text{mm}$ in S235

	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$	Einheit
$l_{\text{Zuglasche}}$	50	50	60	cm
s_2	15	15	15	mm
M	4390	4390	4390	kNm
Q	439	439	439	kN
h_1	42	42	42	cm
z_s	69,42	74,54	80,45	cm
N_1	3162	2945	2728	kN
N_2	3643	3643	3643	kN
ΔN	481	698	915	kN
T	11,45	16,62	21,78	kN/cm
r_1	7,63	11,08	14,52	kN/cm ²
r_2	2,38	2,38	2,38	kN/cm ²
$\sigma_{x,1}$	24,28	24,28	20,24	kN/cm ²
$\sigma_{x,2}$	24,28	24,28	20,24	kN/cm ²
$\sigma_{v,1}$	27,65	30,95	32,28	kN/cm ²
$\sigma_{v,2}$	24,63	24,63	20,66	kN/cm ²

Tabelle 90: Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für $s=15\text{mm}$ in S355

	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$	Einheit
$l_{Zuglasche}$	60	60	60	cm
s_2	15	15	15	mm
M	4390	4390	4390	kNm
Q	439	439	439	kN
h_1	42	42	42	cm
z_s	66,67	72,05	78,33	cm
N_1	3292	3047	2803	kN
N_2	3643	3643	3643	kN
ΔN	351	596	840	kN
T	8,36	14,20	20,00	kN/cm
τ_1	5,57	9,47	13,34	kN/cm ²
τ_2	2,97	2,97	2,97	kN/cm ²
$\sigma_{x,1}$	20,24	20,24	20,24	kN/cm ²
$\sigma_{x,2}$	25,29	25,29	25,29	kN/cm ²
$\sigma_{v,1}$	24,89	26,06	30,72	kN/cm ²
$\sigma_{v,2}$	25,81	25,81	25,81	kN/cm ²

Tabelle 91: Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für $s=12\text{mm}$ in S355

	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$	Einheit
$l_{Zuglasche}$	70	70	70	cm
s_2	15	15	15	mm
M	4390	4390	4390	kNm
Q	439	439	439	kN
h_1	42	42	42	cm
z_s	64,82	70,35	76,86	cm
N_1	3386	3120	2855	kN
N_2	3643	3643	3643	kN
ΔN	257	523	788	kN
T	6,12	12,45	18,76	kN/cm
τ_1	4,08	8,30	12,05	kN/cm ²
τ_2	3,56	3,56	3,56	kN/cm ²
$\sigma_{x,1}$	17,35	17,35	17,35	kN/cm ²
$\sigma_{x,2}$	26,03	26,03	26,03	kN/cm ²
$\sigma_{v,1}$	18,74	22,53	27,15	kN/cm ²
$\sigma_{v,2}$	26,75	26,75	26,75	kN/cm ²

Tabelle 92: Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für $s=10\text{mm}$ in S355

	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$	Einheit
$l_{Zuglasche}$	80	80	80	cm
s_2	15	15	15	mm
M	4390	4390	4390	kNm
Q	439	439	439	kN
h_1	42	42	42	cm
z_s	62,78	68,45	75,19	cm
N_1	3496	3207	2912	kN
N_2	3643	3643	3643	kN
ΔN	147	436	731	kN
T	3,50	10,38	17,41	kN/cm
τ_1	2,34	8,92	11,61	kN/cm ²
τ_2	4,46	4,46	4,46	kN/cm ²
$\sigma_{x,1}$	15,18	15,18	15,18	kN/cm ²
$\sigma_{x,2}$	28,46	28,46	28,46	kN/cm ²
$\sigma_{v,1}$	15,71	21,70	25,20	kN/cm ²
$\sigma_{v,2}$	29,49	29,49	29,49	kN/cm ²

Tabelle 93: Bestimmung der Lasteinleitungslänge der Zuglasche für $s=8\text{mm}$ in S355

B4 Zugehörige Berechnungen zu Kapitel 6.3.1.3

Dicke		$t_{OG}=$	$t_{OG}=$	$t_{OG}=$	$t_{OG}=$	$t_{OG}=$	Einheit
Steg		35mm	30mm	25mm	20mm	15mm	
22mm	z_s	61,20	59,07	56,76	54,26	51,53	cm
	I_y	1,310	1,242	1,167	1,085	0,996	$cm^4 \cdot 10^6$
	σ_{OG}	19,48	21,64	23,85	26,61	30,14	kN/cm^2
	$\sigma_{OG}/\sigma_{R,d,S235}$	0,89	0,99	1,09	1,21	-	-
	$\sigma_{OG}/\sigma_{R,d,S355}$	0,59	0,66	0,73	0,82	0,92	-
15mm	z_s	60,98	58,40	55,57	52,45	48,99	cm
	I_y	1,221	1,150	1,072	0,985	0,888	$cm^4 \cdot 10^6$
	σ_{OG}	21,36	23,60	26,52	30,08	34,99	kN/cm^2
	$\sigma_{OG}/\sigma_{R,d,S235}$	0,98	1,08	1,21	1,37	-	-
	$\sigma_{OG}/\sigma_{R,d,S355}$	0,65	0,72	0,81	0,92	1,07	-
12mm	z_s	60,85	58,03	54,91	51,43	47,53	cm
	I_y	1,183	1,111	1,031	0,941	0,840	$cm^4 \cdot 10^6$
	σ_{OG}	22,09	24,57	27,75	31,94	37,72	kN/cm^2
	$\sigma_{OG}/\sigma_{R,d,S235}$	1,01	1,12	1,27	1,46	-	-
	$\sigma_{OG}/\sigma_{R,d,S355}$	0,67	0,75	0,85	0,98	1,15	-
10mm	z_s	60,76	57,75	54,39	50,63	46,39	cm
	I_y	1,157	1,085	1,003	0,911	0,807	$cm^4 \cdot 10^6$
	σ_{OG}	22,61	25,27	28,72	33,35	39,86	kN/cm^2
	$\sigma_{OG}/\sigma_{R,d,S235}$	1,03	1,16	1,31	1,53	-	-
	$\sigma_{OG}/\sigma_{R,d,S355}$	0,69	0,77	0,88	1,02	1,22	-
8mm	z_s	60,65	57,43	53,81	49,72	45,07	cm
	I_y	1,132	1,059	0,976	0,881	0,773	$cm^4 \cdot 10^6$
	σ_{OG}	23,15	26,03	29,79	34,92	42,33	kN/cm^2
	$\sigma_{OG}/\sigma_{R,d,S235}$	1,07	1,19	1,36	1,60	-	-
	$\sigma_{OG}/\sigma_{R,d,S355}$	0,71	0,79	0,91	1,07	1,29	-

Tabelle 94: Nachweisstelle 1 zur Festlegung der Aufdickung im Obergurt

Die Nachweisstelle $x[m]$ beim Nachweis 2 ergibt sich aus der Länge der Lasteinleitung + 200mm, da der Steg konstruktiv im Anschluss um 200mm ausgeklinkt wird und somit die Zuglasche um diesen Betrag eingerückt werden muss. Die Dicke des Untergurts wird für die Nachweisführung mit 15mm festgelegt, sodass die Spannung maximal wird.

Dicke Steg		t _{OG} = 30mm	t _{OG} = 25mm	t _{OG} = 20mm	Einheit
22mm	NW-Stelle	x=8,9m	x=8,9m	x=8,9m	-
	M _{y(x)}	3907	3907	3907	kNm
	h _{2(x)}	157,4	157,4	157,4	cm
	z _s	80,17	77,58	74,78	cm
	I _y	2,008	1,899	1,781	cm ⁴ · 10 ⁶
	σ _{OG}	15,03	16,42	18,12	kN/cm ²
	σ _{OG} /σ _{R,d}	0,69	0,75	0,83	-
15mm	NW-Stelle	x=9,0m	x=9,0m	x=9,0m	cm
	M _{y(x)}	3951	3951	3951	kNm
	h _{2(x)}	158,6	158,6	158,6	cm
	z _s	81,31	78,02	74,41	cm
	I _y	1,830	1,718	1,595	cm ⁴ · 10 ⁶
	σ _{OG}	16,69	18,53	20,86	kN/cm ²
	σ _{OG} /σ _{R,d}	0,76	0,85	0,95	-
12mm	NW-Stelle	x=8,9m	x=8,9	x=8,9	cm
	M _{y(x)}	3907	3907	3907	kNm
	h _{2(x)}	157,4	157,4	157,4	cm
	z _s	81,01	77,33	73,25	cm
	I _y	1,709	1,598	1,475	cm ⁴ · 10 ⁶
	σ _{OG}	17,47	19,57	22,30	kN/cm ²
	σ _{OG} /σ _{R,d}	0,80	0,89	1,02	-
10mm	NW-Stelle	x=8,7m	x=8,7m	x=8,7m	cm
	M _{y(x)}	3819	3819	3819	kNm
	h _{2(x)}	154,8	154,8	154,8	cm
	z _s	79,92	75,97	71,53	cm
	I _y	1,589	1,482	1,361	cm ⁴ · 10 ⁶
	σ _{OG}	18,00	20,31	23,37	kN/cm ²
	σ _{OG} /σ _{R,d}	0,82	0,93	1,07	-
8mm	NW-Stelle	x=8,6m	x=8,6m	x=8,6m	cm
	M _{y(x)}	3775	3775	3775	kNm
	h _{2(x)}	153,6	153,6	153,6	cm
	z _s	79,59	75,29	70,40	cm
	I _y	1,506	1,401	1,280	cm ⁴ · 10 ⁶
	σ _{OG}	18,55	21,11	24,54	kN/cm ²
	σ _{OG} /σ _{R,d}	0,85	0,96	1,12	-

Tabelle 95: Nachweisstelle 2 zur Festlegung der Aufdickung im Obergurt in S235

Die Festlegung der Aufdickungslänge im Obergurt ist unter Beachtung der b/t-Verhältnisse und damit einer Spannungsbegrenzung von 22,65kN/cm² durchzuführen.

Dicke OG						Einheit
		s=15mm	s=12mm	s=10mm	s=8mm	
15mm	NW-Stelle	x=4,7m	x=3,8m	x=3,4m	x=3,0m	-
	$M_{y(x)}$	2063	1668	1493	1317	kNm
	$h_{2(x)}$	104,3	93,00	87,95	82,89	cm
	z_s	44,85	38,96	36,19	33,45	cm
	I_y	0,549	0,403	0,344	0,293	cm ⁴ · 10 ⁶
	σ_{OG}	22,34	22,38	22,45	22,25	kN/cm ²
	σ_{OG}/σ_1	0,99	0,99	0,99	0,98	-

Tabelle 96: Nachweisstelle 2 zur Festlegung der Aufdickung im Obergurt in S355

B5 Zugehörige Berechnungen zu Kapitel 6.3.1.4

Dicke Steg		$t_{OG}=$ 35mm	$t_{OG}=$ 30mm	$t_{OG}=$ 25mm	$t_{OG}=$ 20mm	Einheit
22mm	NW-Stelle	x=8,9m	x=8,9m	x=8,9m	x=8,9m	-
	$M_{y(x)}$	3907	3907	3907	3907	kNm
	$h_{2(x)}$	157,4	157,4	157,4	157,4	cm
	z_s	82,58	80,17	77,58	74,78	cm
	I_y	2,108	2,008	1,899	1,781	cm ⁴ · 10 ⁶
	σ_{OG}	15,31	15,60	15,96	16,40	kN/cm ²
	$\sigma_{OG}/\sigma_{R,d}$	0,70	0,72	0,73	0,75	-
15mm	NW-Stelle	x=9,0m	x=9,0m	x=9,0m	x=9,0m	cm
	$M_{y(x)}$	3951	3951	3951	3951	kNm
	$h_{2(x)}$	158,6	158,6	158,6	158,6	cm
	z_s	84,30	81,31	78,02	74,41	cm
	I_y	1,931	1,830	1,718	1,595	cm ⁴ · 10 ⁶
	σ_{OG}	17,25	17,55	17,94	18,43	kN/cm ²
	$\sigma_{OG}/\sigma_{R,d}$	0,79	0,80	0,82	0,84	-
12mm	NW-Stelle	x=8,9m	x=8,9m	x=8,9	x=8,9	cm
	$M_{y(x)}$	3907	3907	3907	3907	kNm
	$h_{2(x)}$	157,4	157,4	157,4	157,4	cm
	z_s	84,32	81,01	77,33	73,25	cm
	I_y	1,808	1,709	1,598	1,475	cm ⁴ · 10 ⁶
	σ_{OG}	18,22	18,52	18,90	19,41	kN/cm ²
	$\sigma_{OG}/\sigma_{R,d}$	0,84	0,85	0,87	0,89	-
10mm	NW-Stelle	x=8,7m	x=8,7m	x=8,7m	-	cm
	$M_{y(x)}$	3819	3819	3819	-	kNm
	$h_{2(x)}$	154,8	154,8	154,8	-	cm
	z_s	83,46	79,92	75,97	-	cm
	I_y	1,684	1,589	1,482	-	cm ⁴ · 10 ⁶
	σ_{OG}	18,93	19,21	19,58	-	kN/cm ²
	$\sigma_{OG}/\sigma_{R,d}$	0,86	0,88	0,89	-	-
8mm	NW-Stelle	x=8,6m	x=8,6m	x=8,6m	-	cm
	$M_{y(x)}$	3775	3775	3775	-	kNm
	$h_{2(x)}$	153,6	153,6	153,6	-	cm
	z_s	83,40	79,59	75,29	-	cm
	I_y	1,599	1,506	1,401	-	cm ⁴ · 10 ⁶
	σ_{OG}	19,69	19,95	20,29	-	kN/cm ²
	$\sigma_{OG}/\sigma_{R,d}$	0,90	0,91	0,93	-	-

Tabelle 97: Bestimmung der globalen Spannung im Untergurt

B6 Zugehörige Berechnungen zu Kapitel 6.3.2.2Fall 1: Ermittlung der Vergleichsspannung im Schnitt 1-1

Berechnungsgrundlage:

$$\sigma_z = \frac{F_d}{s \cdot l} \quad \text{mit} \quad l = c + 5 \cdot (t + a)$$

c = 42cm (Verschublagerlänge); a = 0,6cm

F_d = 571 kN (Laststellung x=7,5m)

$$\tau = \frac{Q \cdot S_{1-1}}{I_y \cdot s}; \quad \sigma_v = \sqrt{\sigma_z^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

Die Dicke des Obergurts wird mit 25mm gewählt. Nachweisstelle: x=7,5m

		s=22mm	s=15mm	s=12mm	s=10mm	s=8mm
t _{UG} = 30mm	l [cm]	60	60	60	60	60
	σ _z [kN/cm²]	4,32	6,34	7,93	9,52	11,89
	τ [kN/cm²]	1,77	2,72	3,46	4,20	5,30
	σ _v [kN/cm²]	5,29	7,90	9,93	11,98	15,02
t _{UG} = 25mm	l [cm]	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5
	σ _z [kN/cm²]	4,52	6,62	8,27	9,93	12,41
	τ [kN/cm²]	1,66	2,60	3,33	4,06	5,15
	σ _v [kN/cm²]	5,35	8,00	10,08	12,16	15,28
t _{UG} = 20mm	l [cm]	55	55	55	55	55
	σ _z [kN/cm²]	4,72	6,92	8,65	10,38	12,98
	τ [kN/cm²]	1,53	2,43	3,15	3,87	4,94
	σ _v [kN/cm²]	5,41	8,10	10,23	12,36	15,54
t _{UG} = 15mm	l [cm]	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5
	σ _z [kN/cm²]	4,94	7,25	9,07	10,87	13,59
	τ [kN/cm²]	1,36	2,21	2,89	3,59	4,64
	σ _v [kN/cm²]	5,47	8,20	10,36	12,53	15,79

Tabelle 98: Spannung infolge konzentrierter Lasteinleitung

B7 Zugehörige Berechnungen zu Kapitel 6.3.4.1

	Dicke Stegblech									
	s = 22mm		s = 15mm		s = 12mm		s = 10mm		s = 8mm	
t_{UG} [mm]	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15
t_{OG} [mm]	20	35	20	35	20	35	25	35	25	35
<i>Länge Zug-lasche</i> [cm]	90	90	100	100	110	110	130	130	150	150
<i>QS-Höhe</i> [cm]	154,2	154,2	153	153	151,8	151,8	149,4	149,4	147	147
h_{Steg} [cm]	149,2	149,2	148,0	148,0	146,8	146,8	144,4	144,4	142,0	142,0
<i>maßg. M_y</i> [kNm]	3995	3995	3951	3951	3907	3907	3819	3819	3731	3731
I_y [cm ⁴] · 10 ⁶	2,123	2,008	1,863	1,779	1,732	1,667	1,773	1,557	1,654	1,453
σ_{UG} [kN/cm ²]	11,02	15,81	11,61	17,74	11,82	18,73	11,65	19,41	11,71	20,13
σ_{OG} [kN/cm ²]	- 17,06	- 13,88	- 19,78	- 15,12	- 21,28	- 15,68	- 19,35	- 16,01	- 20,21	- 16,33
ψ	-0,64	-0,87	-0,59	-0,85	-0,56	-0,84	-0,61	-0,83	-0,58	-0,82

Tabelle 99: Spannungsverhältnis im Stegblech in S235

	Dicke Stegblech							
	s = 15mm		s = 12mm		s = 10mm		s = 8mm	
t_{UG} [mm]	25	15	25	15	25	15	25	15
t_{OG} [mm]	15	30	20	30	20	30	20	30
<i>Länge Zug-lasche</i> [cm]	60	60	70	70	80	80	90	90
<i>QS-Höhe</i> [cm]	157,8	157,8	156,6	156,6	155,4	155,4	154,2	154,2
<i>Steghöhe</i> [cm]	153,3	153,3	152,1	152,1	150,9	150,9	149,7	149,7
<i>maßg. M_y</i> [kNm]	4127	4127	4083	4083	4039	4039	3995	3995
I_y [cm ⁴] · 10 ⁶	1,881	1,809	1,749	1,689	1,652	1,603	1,557	1,519
σ_{UG} [kN/cm ²] (Zugkraft)	13,46	18,11	13,83	19,12	14,05	19,84	14,24	20,62
σ_{OG} [kN/cm ²] (Druckkraft)	20,17	16,86	21,69	17,65	22,85	18,19	24,16	18,75
ψ	-0,67	-0,94	-0,64	-0,93	-0,62	-0,92	-0,59	-0,91

Tabelle 100: Spannungsverhältnis im Stegblech in S355

Beulwerte für unverteiften Zustand für S235

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
30	35	x=0	-14,15	11,03	0	1,85	0,65	0	0,19	0,48
		x=6,5	-5,24	4,09	6,15	2,33	0,24	0,29	0,23	0,20
		x=7,5	-3,41	2,66	6,34	2,40	0,16	0,30	0,24	0,20
	30	x=0	-15,64	11,20	0	1,84	0,72	0	0,18	0,58
		x=6,5	-5,80	4,15	6,15	2,32	0,27	0,29	0,23	0,21
		x=7,5	-3,77	2,70	6,34	2,39	0,17	0,30	0,24	0,20
	25	x=0	-17,48	11,40	0	1,83	0,80	0	0,18	0,71
		x=6,5	-6,47	4,22	6,15	2,31	0,30	0,29	0,23	0,22
		x=7,5	-4,21	2,74	6,34	2,39	0,19	0,30	0,24	0,20
	20	x=0	-19,79	11,67	0	1,83	0,91	0	0,18	0,89
		x=6,5	-7,32	4,32	6,15	2,31	0,34	0,29	0,23	0,23
		x=7,5	-4,76	2,80	6,34	2,38	0,22	0,30	0,24	0,20
25	35	x=0	-14,39	12,65	0	1,84	0,66	0	0,18	0,50
		x=6,5	-5,33	4,96	6,42	2,32	0,24	0,31	0,23	0,21
		x=7,5	-3,47	3,05	6,62	2,39	0,16	0,31	0,24	0,20
	30	x=0	-15,92	12,84	0	1,83	0,73	0	0,18	0,60
		x=6,5	-5,89	4,75	6,42	2,31	0,27	0,31	0,23	0,21
		x=7,5	-3,83	3,09	6,62	2,39	0,18	0,31	0,24	0,20
	25	x=0	-17,79	13,09	0	1,83	0,82	0	0,18	0,73
		x=6,5	-6,58	4,84	6,42	2,31	0,30	0,31	0,23	0,22
		x=7,5	-4,28	3,15	6,62	2,38	0,20	0,31	0,24	0,21
	20	x=0	-20,16	13,41	0	1,82	0,92	0	0,18	0,92
		x=6,5	-7,45	4,96	6,42	2,30	0,34	0,31	0,23	0,24
		x=7,5	-4,84	3,22	6,62	2,37	0,22	0,31	0,24	0,21
20	35	x=0	-14,71	14,79	0	1,83	0,67	0	0,18	0,52
		x=6,5	-5,45	5,48	6,71	2,31	0,25	0,32	0,23	0,21
		x=7,5	-3,54	3,56	6,92	2,39	0,16	0,33	0,24	0,21
	30	x=0	-16,29	15,03	0	1,83	0,75	0	0,18	0,62
		x=6,5	-6,03	5,56	6,71	2,31	0,28	0,32	0,23	0,22
		x=7,5	-3,91	3,61	6,92	2,38	0,18	0,33	0,24	0,21
	25	x=0	-18,22	15,33	0	1,82	0,84	0	0,18	0,76
		x=6,5	-6,74	5,67	6,71	2,30	0,31	0,32	0,23	0,23
		x=7,5	-4,37	3,68	6,92	2,37	0,20	0,33	0,24	0,21

Tabelle 101: Beulwerte für s=15mm in S235, unversteift

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
20	20	x=0	-20,66	15,72	0	1,82	0,95	0	0,18	0,96
		x=6,5	-7,63	5,81	6,71	2,29	0,35	0,32	0,23	0,25
		x=7,5	-4,95	3,77	6,92	2,36	0,23	0,33	0,24	0,22
15	35	x=0	-15,17	17,78	0	1,83	0,70	0	0,18	0,55
		x=6,5	-5,61	6,58	7,03	2,31	0,26	0,33	0,23	0,22
		x=7,5	-3,65	4,27	7,25	2,38	0,17	0,34	0,24	0,22
	30	x=0	-16,82	18,08	0	1,82	0,77	0	0,18	0,66
		x=6,5	-6,22	6,68	7,03	2,30	0,28	0,33	0,23	0,23
		x=7,5	-4,04	4,34	7,25	2,37	0,19	0,34	0,24	0,22
	25	x=0	-18,84	18,46	0	1,82	0,86	0	0,18	0,81
		x=6,5	-6,96	6,82	7,03	2,29	0,32	0,33	0,23	0,24
		x=7,5	-4,52	4,43	7,25	2,36	0,21	0,34	0,24	0,22
	20	x=0	-21,39	18,95	0	1,81	0,98	0	0,18	1,02
		x=6,5	-7,90	7,00	7,03	2,28	0,36	0,33	0,23	0,26
		x=7,5	-5,12	4,54	7,25	2,36	0,23	0,34	0,24	0,23

Tabelle 102: Beulwerte für s=15mm in S235, unverteilt - Fortsetzung

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
30	35	x=0	-14,82	11,31	0	2,31	0,68	0	0,29	0,64
		x=6,5	-5,49	4,19	7,69	2,91	0,25	0,37	0,36	0,42
		x=7,5	-3,57	2,73	7,93	3,00	0,16	0,39	0,38	0,43
	30	x=0	-16,51	11,47	0	2,30	0,76	0	0,29	0,75
		x=6,5	-6,12	4,25	7,69	2,90	0,28	0,37	0,36	0,43
		x=7,5	-3,98	2,76	7,93	2,99	0,18	0,39	0,37	0,43
	25	x=0	-18,62	11,66	0	2,29	0,85	0	0,29	0,90
		x=6,5	-6,89	4,32	7,69	2,89	0,32	0,37	0,36	0,44
		x=7,5	-4,48	2,81	7,93	2,98	0,21	0,39	0,37	0,43
	20	x=0	-21,33	11,92	0	2,29	0,98	0	0,29	1,13
		x=6,5	-7,89	4,41	7,69	2,88	0,36	0,37	0,36	0,46
		x=7,5	-5,13	2,86	7,93	2,97	0,23	0,39	0,37	0,43
25	35	x=0	-15,03	13,06	0	2,30	0,69	0	0,29	0,65
		x=6,5	-5,57	4,84	8,02	2,90	0,26	0,39	0,36	0,43
		x=7,5	-3,62	3,15	8,28	2,99	0,17	0,40	0,37	0,44
	30	x=0	-16,79	13,25	0	2,29	0,77	0	0,29	0,76
		x=6,5	-6,20	4,90	8,02	2,89	0,28	0,39	0,36	0,44
		x=7,5	-4,03	3,19	8,28	2,98	0,18	0,40	0,37	0,44
	25	x=0	-18,91	13,48	0	2,29	0,87	0	0,29	0,92
		x=6,5	-6,99	4,99	8,02	2,88	0,32	0,39	0,36	0,45
		x=7,5	-4,54	3,24	8,28	2,97	0,21	0,40	0,37	0,44
	20	x=0	-21,67	13,80	0	2,28	0,99	0	0,29	1,16
		x=6,5	-8,01	5,10	8,02	2,87	0,37	0,39	0,36	0,47
		x=7,5	-5,20	3,31	8,28	2,96	0,24	0,40	0,37	0,44
20	35	x=0	-15,34	15,43	0	2,29	0,70	0	0,29	0,67
		x=6,5	-5,68	5,71	8,38	2,89	0,26	0,41	0,36	0,44
		x=7,5	-3,69	3,71	8,65	2,98	0,17	0,42	0,37	0,45
	30	x=0	-17,10	15,66	0	2,29	0,78	0	0,29	0,79
		x=6,5	-6,33	5,79	8,38	2,88	0,29	0,41	0,36	0,45
		x=7,5	-4,11	3,76	8,65	2,97	0,19	0,42	0,37	0,45
	25	x=0	-19,31	15,95	0	2,28	0,89	0	0,29	0,96
		x=6,5	-7,14	5,90	8,38	2,87	0,33	0,41	0,36	0,46
		x=7,5	-4,64	3,83	8,65	2,96	0,21	0,42	0,37	0,45

Tabelle 103: Beulwerte für s=12mm in S235, unverteilt

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
20	20	x=0	-22,16	16,33	0	2,27	1,02	0	0,28	1,20
		x=6,5	-8,19	6,03	8,38	2,86	0,38	0,41	0,36	0,48
		x=7,5	-5,31	3,92	8,65	2,96	0,24	0,42	0,37	0,46
15	35	x=0	-15,78	18,80	0	2,29	0,72	0	0,29	0,70
		x=6,5	-5,84	6,96	8,78	2,88	0,27	0,43	0,36	0,46
		x=7,5	-3,79	4,52	9,06	2,97	0,17	0,44	0,37	0,47
	30	x=0	-17,62	19,09	0	2,28	0,81	0	0,29	0,82
		x=6,5	-6,51	7,06	8,78	2,87	0,30	0,43	0,36	0,47
		x=7,5	-4,23	4,58	9,06	2,96	0,19	0,44	0,37	0,47
	25	x=0	-19,91	19,47	0	2,27	0,91	0	0,28	1,01
		x=6,5	-7,36	7,19	8,78	2,86	0,34	0,43	0,36	0,48
		x=7,5	-4,77	4,67	9,06	2,96	0,22	0,44	0,37	0,47
	20	x=0	-22,87	19,96	0	2,27	1,05	0	0,28	1,27
		x=6,5	-8,45	7,37	8,78	2,86	0,39	0,43	0,36	0,50
		x=7,5	-5,48	4,78	9,06	2,95	0,25	0,44	0,37	0,47

Tabelle 104: Beulwerte für s=12mm in S235, unverteilt - Fortsetzung

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
30	35	x=0	-15,31	11,50	0	2,77	0,73	0	0,48	0,97
		x=6,5	-5,68	4,26	9,22	3,49	0,27	0,46	0,60	0,85
		x=7,5	-3,69	2,77	9,52	3,60	0,18	0,48	0,62	0,86
	30	x=0	-17,15	11,64	0	2,76	0,82	0	0,48	1,10
		x=6,5	-6,35	4,31	9,22	3,48	0,30	0,46	0,60	0,86
		x=7,5	-4,13	2,80	9,52	3,59	0,20	0,48	0,62	0,86
	25	x=0	-19,48	11,82	0	2,75	0,93	0	0,48	1,28
		x=6,5	-7,21	4,38	9,22	3,47	0,34	0,46	0,60	0,88
		x=7,5	-4,69	2,84	9,52	3,58	0,22	0,48	0,62	0,86
25	35	x=0	-15,51	13,35	0	2,76	0,74	0	0,48	0,98
		x=6,5	-5,74	4,95	9,62	3,48	0,27	0,48	0,60	0,87
		x=7,5	-3,74	3,22	9,93	3,59	0,18	0,50	0,62	0,88
	30	x=0	-17,38	13,52	0	2,75	0,83	0	0,48	1,11
		x=6,5	-6,43	5,01	9,62	3,47	0,31	0,48	0,60	0,88
		x=7,5	-4,18	3,25	9,93	3,58	0,20	0,50	0,62	0,88
	25	x=0	-19,75	13,75	0	2,74	0,94	0	0,48	1,30
		x=6,5	-7,31	5,09	9,62	3,46	0,35	0,48	0,60	0,90
		x=7,5	-4,75	3,30	9,93	3,57	0,23	0,50	0,62	0,88
20	35	x=0	-15,78	15,89	0	2,75	0,75	0	0,48	1,00
		x=6,5	-5,84	5,88	10,06	3,47	0,28	0,50	0,60	0,89
		x=7,5	-3,80	3,82	10,38	3,58	0,18	0,52	0,62	0,90
	30	x=0	-17,70	16,10	0	2,74	0,84	0	0,48	1,14
		x=6,5	-6,55	5,96	10,06	3,46	0,31	0,50	0,60	0,90
		x=7,5	-4,25	3,87	10,38	3,57	0,20	0,52	0,62	0,90
	25	x=0	-20,13	16,38	0	2,74	0,96	0	0,47	1,33
		x=6,5	-7,44	6,05	10,06	3,45	0,35	0,50	0,60	0,92
		x=7,5	-4,83	3,93	10,38	3,56	0,23	0,52	0,62	0,90
15	35	x=0	-16,20	19,57	0	2,74	0,77	0	0,48	1,03
		x=6,5	-5,99	7,24	10,54	3,46	0,29	0,53	0,60	0,91
		x=7,5	-3,89	4,70	10,88	3,57	0,19	0,55	0,62	0,92
	30	x=0	-18,19	19,84	0	2,74	0,87	0	0,47	1,17
		x=6,5	-6,72	7,34	10,54	3,45	0,32	0,53	0,60	0,92
		x=7,5	-4,37	4,76	10,88	3,56	0,21	0,55	0,62	0,92
	25	x=0	-20,71	20,20	0	2,73	0,99	0	0,47	1,38
		x=6,5	-7,65	7,46	10,54	3,44	0,36	0,53	0,60	0,94
		x=7,5	-4,96	4,84	10,88	3,55	0,24	0,55	0,61	0,93

Tabelle 105: Beulwerte für s=10mm in S235, unversteift

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
30	35	x=0	-15,85	11,68	0	3,46	0,89	0	0,94	1,78
		x=6,5	-5,87	4,33	11,53	4,36	0,33	0,61	1,18	1,83
		x=7,5	-3,82	2,82	11,90	4,50	0,22	0,63	1,22	1,81
	30	x=0	-17,87	11,81	0	3,45	1,01	0	0,93	1,94
		x=6,5	-6,62	4,37	11,53	4,35	0,37	0,61	1,18	1,86
		x=7,5	-4,30	2,84	11,90	4,49	0,24	0,63	1,21	1,82
	25	x=0	-20,46	11,97	0	3,44	1,15	0	0,93	2,16
		x=6,5	-7,57	4,43	11,53	4,34	0,43	0,61	1,17	1,90
		x=7,5	-4,92	2,88	11,90	4,47	0,28	0,63	1,21	1,84
25	35	x=0	-16,01	13,65	0	3,45	0,90	0	0,93	1,79
		x=6,5	-5,93	5,06	12,03	4,35	0,33	0,63	1,18	1,86
		x=7,5	-3,86	3,29	12,41	4,49	0,22	0,65	1,21	1,84
	30	x=0	-18,06	13,80	0	3,44	1,02	0	0,93	1,95
		x=6,5	-6,69	5,11	12,03	4,34	0,38	0,63	1,17	1,89
		x=7,5	-4,35	3,32	12,41	4,47	0,25	0,65	1,21	1,85
	25	x=0	-20,69	14,00	0	3,43	1,17	0	0,93	2,17
		x=6,5	-7,66	5,18	12,03	4,32	0,43	0,63	1,17	1,94
		x=7,5	-4,97	3,36	12,41	4,46	0,28	0,65	1,21	1,87
20	35	x=0	-16,26	16,37	0	3,44	0,92	0	0,93	1,81
		x=6,5	-6,02	6,06	12,58	4,34	0,34	0,66	1,17	1,89
		x=7,5	-3,91	3,94	12,98	4,47	0,22	0,68	1,21	1,87
	30	x=0	-18,35	16,56	0	3,43	1,04	0	0,93	1,97
		x=6,5	-6,79	6,13	12,58	4,32	0,38	0,66	1,17	1,93
		x=7,5	-4,41	3,98	12,98	4,46	0,25	0,68	1,21	1,89
	25	x=0	-21,03	16,82	0	3,42	1,19	0	0,93	2,20
		x=6,5	-7,78	6,22	12,58	4,31	0,44	0,66	1,17	1,97
		x=7,5	-5,05	4,04	12,98	4,45	0,28	0,68	1,20	1,91
15	35	x=0	-16,63	20,41	0	3,43	0,94	0	0,93	1,84
		x=6,5	-6,15	7,55	13,18	4,32	0,35	0,69	1,17	1,93
		x=7,5	-4,00	4,90	13,60	4,46	0,23	0,72	1,21	1,91
	30	x=0	-18,79	20,66	0	3,42	1,06	0	0,93	2,01
		x=6,5	-6,95	7,64	13,18	4,31	0,39	0,69	1,17	1,97
		x=7,5	-4,51	4,96	13,60	4,45	0,25	0,72	1,20	1,93
	25	x=0	-21,56	20,99	0	3,41	1,22	0	0,92	2,24
		x=6,5	-7,97	7,76	13,18	4,30	0,45	0,69	1,16	2,02
		x=7,5	-5,17	5,03	13,60	4,43	0,29	0,72	1,20	1,95

Tabelle 106: Beulwerte für s=8mm in S235, unversteift

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
25	30	x=0	-16,76	13,25	0	2,29	0,54	0	0,28	0,55
		x=6,5	-6,20	4,90	8,02	2,89	0,20	0,27	0,35	0,43
		x=7,5	-4,03	3,19	8,28	2,98	0,13	0,28	0,36	0,43
	25	x=0	-18,91	13,48	0	2,29	0,61	0	0,28	0,63
		x=6,5	-6,99	4,99	8,02	2,88	0,23	0,27	0,35	0,44
		x=7,5	-4,54	3,24	8,28	2,97	0,15	0,28	0,36	0,43
	20	x=0	-21,67	13,80	0	2,28	0,70	0	0,27	0,74
		x=6,5	-8,01	5,10	8,02	2,87	0,26	0,27	0,35	0,46
		x=7,5	-5,20	3,31	8,28	2,96	0,17	0,28	0,36	0,44
	15	x=0	-25,36	14,22	0	2,27	0,82	0	0,27	0,91
		x=6,5	-9,37	5,25	8,02	2,86	0,30	0,27	0,34	0,48
		x=7,5	-6,08	3,41	8,28	2,96	0,20	0,28	0,36	0,44
20	30	x=0	-17,10	15,66	0	2,29	0,55	0	0,28	0,56
		x=6,5	-6,33	5,79	8,38	2,88	0,20	0,28	0,35	0,44
		x=7,5	-4,11	3,76	8,65	2,97	0,13	0,29	0,36	0,44
	25	x=0	-19,31	15,95	0	2,28	0,62	0	0,27	0,64
		x=6,5	-7,14	5,90	8,38	2,87	0,23	0,28	0,35	0,45
		x=7,5	-4,64	3,83	8,65	2,96	0,15	0,29	0,36	0,44
	20	x=0	-22,16	16,33	0	2,27	0,71	0	0,27	0,76
		x=6,5	-8,19	6,03	8,38	2,86	0,26	0,28	0,34	0,47
		x=7,5	-5,31	3,92	8,65	2,96	0,17	0,29	0,36	0,44
	15	x=0	-25,96	16,86	0	2,27	0,84	0	0,27	0,94
		x=6,5	-9,58	6,22	8,38	2,86	0,31	0,28	0,34	0,49
		x=7,5	-6,22	4,04	8,65	2,95	0,20	0,29	0,35	0,45
15	30	x=0	-17,62	19,09	0	2,28	0,57	0	0,27	0,58
		x=6,5	-6,51	7,06	8,78	2,87	0,21	0,29	0,35	0,45
		x=7,5	-4,23	4,58	9,06	2,96	0,14	0,30	0,36	0,44
	25	x=0	-19,91	19,47	0	2,27	0,64	0	0,27	0,66
		x=6,5	-7,36	7,19	8,78	2,86	0,24	0,29	0,34	0,46
		x=7,5	-4,77	4,67	9,06	2,96	0,15	0,30	0,36	0,45
	20	x=0	-22,87	19,96	0	2,27	0,74	0	0,27	0,79
		x=6,5	-8,45	7,37	8,78	2,86	0,27	0,29	0,34	0,48
		x=7,5	-5,48	4,78	9,06	2,95	0,18	0,30	0,35	0,45
	15	x=0	-26,84	20,63	0	2,26	0,86	0	0,27	0,98
		x=6,5	-9,90	7,61	8,78	2,85	0,32	0,29	0,34	0,50
		x=7,5	-6,42	4,94	9,06	2,94	0,21	0,30	0,35	0,46

Tabelle 107: Beulwerte für s=12mm in S355, unversteift

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
25	30	x=0	-17,38	13,52	0	2,75	0,64	0	0,48	0,97
		x=6,5	-6,43	5,01	9,62	3,47	0,24	0,34	0,60	0,87
		x=7,5	-4,18	3,25	9,93	3,58	0,15	0,35	0,62	0,84
	25	x=0	-19,75	13,75	0	2,74	0,73	0	0,48	1,08
		x=6,5	-7,31	5,09	9,62	3,46	0,27	0,34	0,60	0,89
		x=7,5	-4,75	3,30	9,93	3,57	0,18	0,35	0,62	0,85
	20	x=0	-22,85	14,05	0	2,74	0,85	0	0,47	1,23
		x=6,5	-8,45	5,19	9,62	3,45	0,31	0,34	0,60	0,92
		x=7,5	-5,48	3,37	9,93	3,56	0,20	0,35	0,62	0,87
	15	x=0	-27,07	14,46	0	2,73	1,00	0	0,47	1,45
		x=6,5	-10,00	5,34	9,62	3,44	0,37	0,34	0,60	0,97
		x=7,5	-6,49	3,47	9,93	3,55	0,24	0,35	0,61	0,89
20	30	x=0	-17,70	16,10	0	2,74	0,66	0	0,48	0,99
		x=6,5	-6,55	5,96	10,06	3,46	0,24	0,35	0,60	0,88
		x=7,5	-4,25	3,87	10,38	3,57	0,16	0,36	0,62	0,86
	25	x=0	-20,13	16,38	0	2,74	0,75	0	0,47	1,10
		x=6,5	-7,44	6,05	10,06	3,45	0,28	0,35	0,60	0,91
		x=7,5	-4,83	3,93	10,38	3,56	0,18	0,36	0,62	0,87
	20	x=0	-23,31	16,75	0	2,73	0,86	0	0,47	1,25
		x=6,5	-8,61	6,19	10,06	3,44	0,32	0,35	0,60	0,94
		x=7,5	-5,59	4,02	10,38	3,55	0,21	0,36	0,61	0,88
	15	x=0	-27,64	17,27	0	2,72	1,02	0	0,47	1,48
		x=6,5	-10,21	6,38	10,06	3,43	0,38	0,35	0,59	0,99
		x=7,5	-6,62	4,14	10,38	3,54	0,25	0,36	0,61	0,91
15	30	x=0	-18,19	19,84	0	2,74	0,67	0	0,47	1,01
		x=6,5	-6,72	7,34	10,54	3,45	0,25	0,37	0,60	0,90
		x=7,5	-4,37	4,76	10,88	3,56	0,16	0,38	0,62	0,87
	25	x=0	-20,71	20,20	0	2,73	0,77	0	0,47	1,12
		x=6,5	-7,65	7,46	10,54	3,44	0,28	0,37	0,60	0,92
		x=7,5	-4,96	4,84	10,88	3,55	0,18	0,38	0,61	0,88
	20	x=0	-24,00	20,69	0	2,72	0,89	0	0,47	1,29
		x=6,5	-8,86	7,64	10,54	3,43	0,33	0,37	0,59	0,96
		x=7,5	-5,75	4,95	10,88	3,54	0,21	0,38	0,61	0,90
	15	x=0	-28,50	21,36	0	2,71	1,06	0	0,47	1,52
		x=6,5	-10,52	7,88	10,54	3,42	0,39	0,37	0,59	1,01
		x=7,5	-6,82	5,11	10,88	3,52	0,25	0,38	0,61	0,93

Tabelle 108: Beulwerte für s=10mm in S355, unversteift

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
25	30	x=0	-18,06	13,80	0	3,44	0,80	0	0,93	1,69
		x=6,5	-6,69	5,11	12,03	4,34	0,30	0,47	1,17	1,75
		x=7,5	-4,35	3,32	12,41	4,47	0,19	0,48	1,21	1,71
	25	x=0	-20,69	14,00	0	3,43	0,92	0	0,93	1,83
		x=6,5	-7,66	5,18	12,03	4,32	0,34	0,47	1,17	1,79
		x=7,5	-4,97	3,36	12,41	4,46	0,22	0,48	1,21	1,73
	20	x=0	-24,19	14,28	0	3,42	1,07	0	0,93	2,01
		x=6,5	-8,95	5,28	12,03	4,31	0,40	0,47	1,17	1,84
		x=7,5	-5,81	3,43	12,41	4,45	0,26	0,48	1,20	1,76
	15	x=0	-29,10	14,68	0	3,41	1,29	0	0,92	2,29
		x=6,5	-10,75	5,42	12,03	4,30	0,48	0,47	1,16	1,91
		x=7,5	-6,98	3,52	12,41	4,43	0,31	0,48	1,20	1,80
20	30	x=0	-18,35	16,56	0	3,43	0,81	0	0,93	1,70
		x=6,5	-6,79	6,13	12,58	4,32	0,30	0,49	1,17	1,77
		x=7,5	-4,41	3,98	12,98	4,46	0,20	0,50	1,21	1,73
	25	x=0	-21,03	16,82	0	3,42	0,93	0	0,93	1,84
		x=6,5	-7,78	6,22	12,58	4,31	0,35	0,49	1,17	1,81
		x=7,5	-5,05	4,04	12,98	4,45	0,22	0,50	1,20	1,75
	20	x=0	-24,61	17,17	0	3,41	1,09	0	0,92	2,03
		x=6,5	-9,09	6,34	12,58	4,30	0,40	0,49	1,16	1,86
		x=7,5	-5,90	4,12	12,98	4,43	0,26	0,50	1,20	1,78
	15	x=0	-29,62	17,67	0	3,40	1,31	0	0,92	2,32
		x=6,5	-10,94	6,52	12,58	4,28	0,49	0,49	1,16	1,94
		x=7,5	-7,09	4,23	12,98	4,42	0,31	0,50	1,20	1,83
15	30	x=0	-18,79	20,66	0	3,42	0,83	0	0,93	1,72
		x=6,5	-6,95	7,64	13,18	4,31	0,31	0,51	1,17	1,80
		x=7,5	-4,51	4,96	13,60	4,45	0,20	0,53	1,20	1,76
	25	x=0	-21,56	20,99	0	3,41	0,96	0	0,92	1,87
		x=6,5	-7,97	7,76	13,18	4,30	0,35	0,51	1,16	1,84
		x=7,5	-5,17	5,03	13,60	4,43	0,23	0,53	1,20	1,78
	20	x=0	-25,26	21,45	0	3,40	1,12	0	0,92	2,07
		x=6,5	-9,33	7,92	13,18	4,28	0,41	0,51	1,16	1,89
		x=7,5	-6,05	5,14	13,60	4,42	0,27	0,53	1,20	1,81
	15	x=0	-30,44	22,11	0	3,39	1,35	0	0,92	2,36
		x=6,5	-11,23	8,16	13,18	4,27	0,50	0,51	1,16	1,98
		x=7,5	-7,28	5,29	13,60	4,41	0,32	0,53	1,19	1,86

Tabelle 109: Beulwerte für s=8mm in S355, unversteift

Beulwerte mit einer Quersteife bei $x=7,1\text{m}$

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
30	35	x=0	-14,82	11,31	0	2,31	0,68	0	0,28	0,62
		x=7,5	-3,57	2,73	7,93	3,00	0,16	0,48	0,36	0,66
	30	x=0	-16,51	11,47	0	2,30	0,76	0	0,28	0,73
		x=7,5	-3,98	2,76	7,93	2,99	0,18	0,48	0,36	0,66
	25	x=0	-18,62	11,66	0	2,29	0,85	0	0,28	0,89
		x=7,5	-4,48	2,81	7,93	2,98	0,21	0,48	0,36	0,67
	20	x=0	-21,33	11,92	0	2,29	0,98	0	0,28	1,12
		x=7,5	-5,13	2,86	7,93	2,97	0,23	0,48	0,36	0,68
25	35	x=0	-15,03	13,06	0	2,30	0,69	0	0,28	0,64
		x=7,5	-3,62	3,15	8,28	2,99	0,17	0,50	0,36	0,68
	30	x=0	-16,76	13,25	0	2,29	0,77	0	0,28	0,75
		x=7,5	-4,03	3,19	8,28	2,98	0,18	0,50	0,36	0,68
	25	x=0	-18,91	13,48	0	2,29	0,87	0	0,28	0,91
		x=7,5	-4,54	3,25	8,28	2,97	0,21	0,50	0,36	0,69
	20	x=0	-21,67	13,80	0	2,28	0,99	0	0,28	1,15
		x=7,5	-5,20	3,31	8,28	2,96	0,24	0,50	0,36	0,70
20	35	x=0	-15,34	15,43	0	2,29	0,70	0	0,28	0,65
		x=7,5	-3,69	3,71	8,65	2,98	0,17	0,53	0,36	0,70
	30	x=0	-17,10	15,66	0	2,29	0,78	0	0,28	0,77
		x=7,5	-4,11	3,76	8,65	2,97	0,19	0,53	0,36	0,71
	25	x=0	-19,31	15,95	0	2,28	0,89	0	0,28	0,94
		x=7,5	-4,64	3,83	8,65	2,96	0,21	0,53	0,36	0,71
	20	x=0	-22,16	16,33	0	2,27	1,02	0	0,28	1,19
		x=7,5	-5,31	3,92	8,65	2,96	0,24	0,53	0,36	0,72
15	35	x=0	-15,78	18,80	0	2,29	0,72	0	0,28	0,68
		x=7,5	-3,79	4,52	9,06	2,97	0,17	0,55	0,36	0,73
	30	x=0	-17,62	19,09	0	2,28	0,81	0	0,28	0,81
		x=7,5	-4,23	4,58	9,06	2,96	0,19	0,55	0,36	0,73
	25	x=0	-19,91	19,47	0	2,27	0,91	0	0,28	0,99
		x=7,5	-4,77	4,67	9,06	2,96	0,22	0,55	0,36	0,74
	20	x=0	-22,87	19,96	0	2,27	1,05	0	0,27	1,26
		x=7,5	-5,48	4,78	9,06	2,95	0,25	0,55	0,36	0,75

Tabelle 110: Beulwerte TF1 für $s=12\text{mm}$ in S235, mit Quersteife

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
30	35	x=0	-14,13	10,60	0	2,81	0,65	0	0,28	0,55
		x=6,5	-1,50	1,13	7,69	3,54	0,07	0,44	0,36	0,53
	30	x=0	-15,83	10,72	0	2,81	0,73	0	0,28	0,65
		x=6,5	-1,69	1,14	7,69	3,54	0,08	0,44	0,36	0,53
	25	x=0	-17,98	10,88	0	2,81	0,82	0	0,28	0,81
		x=6,5	-1,92	1,16	7,69	3,54	0,09	0,44	0,36	0,53
	20	x=0	-20,79	11,10	0	2,81	0,95	0	0,28	1,04
		x=6,5	-2,22	1,18	7,69	3,54	0,10	0,44	0,36	0,53
25	35	x=0	-14,30	12,31	0	2,81	0,66	0	0,28	0,56
		x=6,5	-1,52	1,31	8,02	3,54	0,07	0,46	0,36	0,54
	30	x=0	-16,03	12,47	0	2,81	0,73	0	0,28	0,67
		x=6,5	-1,71	1,33	8,02	3,54	0,08	0,46	0,36	0,55
	25	x=0	-18,22	12,67	0	2,81	0,84	0	0,28	0,83
		x=6,5	-1,94	1,35	8,02	3,54	0,09	0,46	0,36	0,55
	20	x=0	-21,08	12,93	0	2,81	0,97	0	0,28	1,06
		x=6,5	-2,25	1,38	8,02	3,54	0,10	0,46	0,36	0,55
20	35	x=0	-14,54	14,66	0	2,81	0,67	0	0,28	0,57
		x=6,5	-1,55	1,56	8,38	3,54	0,07	0,48	0,36	0,57
	30	x=0	-16,32	14,85	0	2,81	0,75	0	0,28	0,69
		x=6,5	-1,74	1,58	8,38	3,54	0,08	0,48	0,36	0,57
	25	x=0	-18,56	15,10	0	2,81	0,85	0	0,28	0,85
		x=6,5	-1,98	1,61	8,38	3,54	0,09	0,48	0,36	0,57
	20	x=0	-21,50	15,44	0	2,81	0,99	0	0,28	1,10
		x=6,5	-2,29	1,64	8,38	3,54	0,10	0,48	0,36	0,57
15	35	x=0	-14,92	18,06	0	2,81	0,68	0	0,28	0,60
		x=6,5	-1,59	1,92	8,78	3,54	0,07	0,50	0,36	0,59
	30	x=0	-16,76	18,31	0	2,81	0,77	0	0,28	0,72
		x=6,5	-1,79	1,95	8,78	3,54	0,08	0,50	0,36	0,59
	25	x=0	-19,08	18,63	0	2,81	0,87	0	0,28	0,89
		x=6,5	-2,03	1,98	8,78	3,54	0,09	0,50	0,36	0,59
	20	x=0	-22,12	19,07	0	2,81	1,01	0	0,28	1,16
		x=6,5	-2,36	2,03	8,78	3,54	0,11	0,50	0,36	0,59

Tabelle 111: Beulwerte TF2 für s=12mm in S235, mit Quersteife

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
30	35	x=0	-15,31	11,50	0	2,77	0,76	0	0,45	1,00
		x=7,5	-3,69	2,77	9,52	3,60	0,18	0,67	0,58	1,22
	30	x=0	-17,15	11,64	0	2,76	0,85	0	0,45	1,13
		x=7,5	-4,13	2,80	9,52	3,59	0,21	0,67	0,58	1,22
	25	x=0	-19,48	11,82	0	2,75	0,97	0	0,45	1,32
		x=7,5	-4,69	2,84	9,52	3,58	0,23	0,67	0,58	1,24
25	35	x=0	-15,51	13,35	0	2,76	0,77	0	0,45	1,01
		x=7,5	-3,74	3,22	9,93	3,59	0,19	0,70	0,58	1,25
	30	x=0	-17,38	13,52	0	2,75	0,86	0	0,45	1,15
		x=7,5	-4,18	3,25	9,93	3,58	0,21	0,70	0,58	1,26
	25	x=0	-19,75	13,75	0	2,74	0,98	0	0,45	1,34
		x=7,5	-4,75	3,30	9,93	3,57	0,24	0,70	0,58	1,27
20	35	x=0	-15,78	15,89	0	2,75	0,78	0	0,45	1,03
		x=7,5	-3,80	3,82	10,38	3,58	0,19	0,73	0,58	1,28
	30	x=0	-17,70	16,10	0	2,74	0,88	0	0,45	1,17
		x=7,5	-4,25	3,87	10,38	3,57	0,21	0,73	0,58	1,29
	25	x=0	-20,13	16,38	0	2,74	1,00	0	0,44	1,37
		x=7,5	-4,83	3,93	10,38	3,56	0,24	0,73	0,58	1,30
15	35	x=0	-16,20	19,57	0	2,74	0,80	0	0,45	1,06
		x=7,5	-3,89	4,70	10,88	3,57	0,19	0,77	0,58	1,32
	30	x=0	-18,19	19,84	0	2,74	0,90	0	0,44	1,21
		x=7,5	-4,37	4,76	10,88	3,56	0,22	0,77	0,58	1,33
	25	x=0	-20,71	20,20	0	2,73	1,03	0	0,44	1,42
		x=7,5	-4,96	4,84	10,88	3,55	0,25	0,77	0,58	1,35

Tabelle 112: Beulwerte TF1 für s=10mm in S235, mit Quersteife

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
30	35	x=0	-14,53	10,74	0	3,37	0,67	0	0,41	0,72
		x=6,5	-1,55	1,14	9,22	4,25	0,07	0,61	0,51	0,96
	30	x=0	-16,37	10,85	0	3,37	0,75	0	0,41	0,84
		x=6,5	-1,74	1,16	9,22	4,25	0,08	0,61	0,51	0,96
	25	x=0	-18,72	10,99	0	3,37	0,86	0	0,41	1,01
		x=6,5	-1,99	1,17	9,22	4,25	0,09	0,61	0,51	0,96
25	35	x=0	-14,68	12,54	0	3,37	0,67	0	0,41	0,73
		x=6,5	-1,56	1,34	9,62	4,25	0,07	0,63	0,51	0,99
	30	x=0	-16,55	12,68	0	3,37	0,76	0	0,41	0,85
		x=6,5	-1,76	1,35	9,62	4,25	0,08	0,63	0,51	0,99
	25	x=0	-18,94	12,86	0	3,37	0,87	0	0,41	1,03
		x=6,5	-2,02	1,37	9,62	4,25	0,09	0,63	0,51	0,99
20	35	x=0	-14,90	15,03	0	3,37	0,68	0	0,41	0,74
		x=6,5	-1,59	1,60	10,06	4,25	0,07	0,66	0,51	1,02
	30	x=0	-16,81	15,20	0	3,37	0,77	0	0,41	0,87
		x=6,5	-1,79	1,62	10,06	4,25	0,08	0,66	0,51	1,02
	25	x=0	-19,25	15,43	0	3,37	0,88	0	0,41	1,05
		x=6,5	-2,05	1,64	10,06	4,25	0,09	0,66	0,51	1,02
15	35	x=0	-15,25	18,70	0	3,37	0,70	0	0,41	0,76
		x=6,5	-1,62	1,99	10,54	4,25	0,07	0,69	0,51	1,05
	30	x=0	-17,22	18,93	0	3,37	0,79	0	0,41	0,90
		x=6,5	-1,83	2,02	10,54	4,25	0,08	0,69	0,51	1,05
	25	x=0	-19,73	19,23	0	3,37	0,90	0	0,41	1,09
		x=6,5	-2,10	2,05	10,54	4,25	0,10	0,69	0,51	1,06

Tabelle 113: Beulwerte TF2 für s=10mm in S235, mit Quersteife

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
30	35	x=0	-15,85	11,68	0	3,46	0,93	0	0,88	1,78
		x=7,5	-3,82	2,82	11,90	4,50	0,23	1,15	1,14	2,44
	30	x=0	-17,87	11,81	0	3,45	1,05	0	0,88	1,94
		x=7,5	-4,30	2,84	11,90	4,49	0,25	1,15	1,14	2,46
	25	x=0	-20,46	11,97	0	3,44	1,21	0	0,87	2,16
		x=7,5	-4,92	2,88	11,90	4,47	0,29	1,15	1,13	2,48
25	35	x=0	-16,01	13,65	0	3,45	0,94	0	0,88	1,79
		x=7,5	-3,86	3,29	12,41	4,49	0,23	1,20	1,14	2,49
	30	x=0	-18,06	13,80	0	3,44	1,07	0	0,87	1,95
		x=7,5	-4,35	3,32	12,41	4,47	0,26	1,20	1,13	2,51
	25	x=0	-20,69	14,00	0	3,43	1,22	0	0,87	2,17
		x=7,5	-4,97	3,36	12,41	4,46	0,29	1,20	1,13	2,53
20	35	x=0	-16,26	16,37	0	3,44	0,96	0	0,87	1,81
		x=7,5	-3,91	3,94	12,98	4,47	0,23	1,26	1,13	2,54
	30	x=0	-18,35	16,56	0	3,43	1,08	0	0,87	1,97
		x=7,5	-4,41	3,98	12,98	4,46	0,26	1,26	1,13	2,56
	25	x=0	-21,03	16,82	0	3,42	1,24	0	0,87	2,20
		x=7,5	-5,05	4,04	12,98	4,45	0,30	1,26	1,13	2,59
15	35	x=0	-16,63	20,41	0	3,43	0,98	0	0,87	1,83
		x=7,5	-4,00	4,90	13,60	4,46	0,24	1,31	1,13	2,61
	30	x=0	-18,79	20,66	0	3,42	1,11	0	0,87	2,01
		x=7,5	-4,51	4,96	13,60	4,45	0,27	1,31	1,13	2,63
	25	x=0	-21,56	20,99	0	3,41	1,27	0	0,86	2,24
		x=7,5	-5,17	5,03	13,60	4,43	0,30	1,31	1,12	2,66

Tabelle 114: Beulwerte TF1 für s=8mm in S235, mit Quersteife

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
30	35	x=0	-14,97	10,87	0	4,21	0,76	0	0,73	1,32
		x=6,5	-1,59	1,16	11,53	5,31	0,08	0,98	0,92	1,91
	30	x=0	-16,96	10,97	0	4,21	0,86	0	0,73	1,47
		x=6,5	-1,81	1,17	11,53	5,31	0,09	0,98	0,92	1,91
	25	x=0	-19,54	11,09	0	4,21	0,99	0	0,73	1,68
		x=6,5	-2,08	1,18	11,53	5,31	0,11	0,98	0,92	1,92
25	35	x=0	-15,09	12,77	0	4,21	0,77	0	0,73	1,33
		x=6,5	-1,61	1,36	12,03	5,31	0,08	1,03	0,92	1,96
	30	x=0	-17,11	12,88	0	4,21	0,87	0	0,73	1,48
		x=6,5	-1,82	1,37	12,03	5,31	0,09	1,03	0,92	1,96
	25	x=0	-19,73	13,04	0	4,21	1,00	0	0,73	1,69
		x=6,5	2,10	1,39	12,03	5,31	0,11	1,03	0,92	1,97
20	35	x=0	-15,28	15,41	0	4,21	0,78	0	0,73	1,34
		x=6,5	-1,63	1,64	12,58	5,31	0,08	1,07	0,92	2,01
	30	x=0	-17,33	15,57	0	4,21	0,88	0	0,73	1,50
		x=6,5	-1,85	1,66	12,58	5,31	0,09	1,07	0,92	2,01
	25	x=0	-20,00	15,77	0	4,21	1,01	0	0,73	1,71
		x=6,5	-2,13	1,68	12,58	5,31	0,11	1,07	0,92	2,02
15	35	x=0	-15,58	19,39	0	4,21	0,79	0	0,73	1,37
		x=6,5	-1,66	2,07	13,18	5,31	0,08	1,12	0,92	2,06
	30	x=0	-17,69	19,60	0	4,21	0,90	0	0,73	1,53
		x=6,5	-1,88	2,09	13,18	5,31	0,10	1,12	0,92	2,07
	25	x=0	-20,43	19,87	0	4,21	1,04	0	0,73	1,75
		x=6,5	-2,18	2,12	13,18	5,31	0,11	1,12	0,92	2,07

Tabelle 115: Beulwerte TF2 für s=8mm in S235, mit Quersteife

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
25	30	x=0	-17,38	13,52	0	2,75	0,67	0	0,45	0,99
		x=7,5	-4,18	3,25	9,93	3,58	0,16	0,62	0,58	1,25
	25	x=0	-19,75	13,75	0	2,74	0,76	0	0,45	1,10
		x=7,5	-4,75	3,30	9,93	3,57	0,18	0,62	0,58	1,26
	20	x=0	-22,85	14,05	0	2,74	0,88	0	0,44	1,26
		x=7,5	-5,48	3,37	9,93	3,56	0,21	0,62	0,58	1,28
	15	x=0	-27,07	14,46	0	2,73	1,05	0	0,44	1,48
		x=7,5	-6,49	3,47	9,93	3,55	0,25	0,62	0,58	1,31
20	30	x=0	-17,70	16,10	0	2,74	0,68	0	0,45	1,01
		x=7,5	-4,25	3,87	10,38	3,57	0,16	0,65	0,58	1,28
	25	x=0	-20,13	16,38	0	2,74	0,78	0	0,44	1,12
		x=7,5	-4,83	3,93	10,38	3,56	0,19	0,65	0,58	1,29
	20	x=0	-23,31	16,75	0	2,73	0,90	0	0,44	1,28
		x=7,5	-5,59	4,02	10,38	3,55	0,22	0,65	0,58	1,31
	15	x=0	-27,64	17,27	0	2,72	1,07	0	0,44	1,51
		x=7,5	-6,62	4,14	10,38	3,54	0,26	0,65	0,57	1,34
15	30	x=0	-18,19	19,84	0	2,74	0,70	0	0,44	1,03
		x=7,5	-4,37	4,76	10,88	3,56	0,17	0,68	0,58	1,31
	25	x=0	-20,71	20,20	0	2,73	0,80	0	0,44	1,15
		x=7,5	-4,96	4,84	10,88	3,55	0,19	0,68	0,58	1,33
	20	x=0	-24,00	20,69	0	2,72	0,93	0	0,44	1,31
		x=7,5	-5,75	4,95	10,88	3,54	0,22	0,68	0,57	1,35
	15	x=0	-28,50	21,36	0	2,71	1,10	0	0,44	1,56
		x=7,5	-6,82	5,11	10,88	3,52	0,26	0,68	0,57	1,38

Tabelle 116: Beulwerte TF1 für s=10mm in S355, mit Quersteife

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
25	30	x=0	-16,55	12,68	0	3,37	0,55	0	0,37	0,67
		x=6,5	-1,76	1,35	9,62	4,25	0,06	0,53	0,47	0,94
	25	x=0	-18,94	12,86	0	3,37	0,63	0	0,37	0,76
		x=6,5	-2,02	1,37	9,62	4,25	0,07	0,53	0,47	0,94
	20	x=0	-22,10	13,11	0	3,37	0,74	0	0,37	0,90
		x=6,5	-2,35	1,40	9,62	4,25	0,08	0,53	0,47	0,95
	15	x=0	-26,51	13,47	0	3,37	0,88	0	0,37	1,11
		x=6,5	-2,82	1,44	9,62	4,25	0,09	0,53	0,47	0,95
20	30	x=0	-16,81	15,20	0	3,37	0,56	0	0,37	0,68
		x=6,5	-1,79	1,62	10,06	4,25	0,06	0,56	0,47	0,97
	25	x=0	-19,25	15,43	0	3,37	0,64	0	0,37	0,77
		x=6,5	-2,05	1,64	10,06	4,25	0,07	0,56	0,47	0,97
	20	x=0	-22,48	15,75	0	3,37	0,75	0	0,37	0,92
		x=6,5	-2,40	1,68	10,06	4,25	0,08	0,56	0,47	0,97
	15	x=0	-26,99	16,21	0	3,37	0,90	0	0,37	1,14
		x=6,5	-2,88	1,73	10,06	4,25	0,10	0,56	0,47	0,98
15	30	x=0	-17,22	18,93	0	3,37	0,57	0	0,37	0,69
		x=6,5	-1,83	2,02	10,54	4,25	0,06	0,58	0,47	0,99
	25	x=0	-19,73	19,23	0	3,37	0,66	0	0,37	0,79
		x=6,5	-2,10	2,05	10,54	4,25	0,07	0,58	0,47	1,00
	20	x=0	-23,08	19,65	0	3,37	0,77	0	0,37	0,94
		x=6,5	-2,46	2,09	10,54	4,25	0,08	0,58	0,47	1,00
	15	x=0	-27,74	20,26	0	3,37	0,92	0	0,37	1,18
		x=6,5	-2,95	2,16	10,54	4,25	0,10	0,58	0,47	1,00

Tabelle 117: Beulwerte TF2 für s=10mm in S355, mit Quersteife

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
25	30	x=0	-18,06	13,80	0	3,44	0,84	0	0,87	1,68
		x=7,5	-4,35	3,32	12,41	4,47	0,20	1,12	1,13	2,41
	25	x=0	-20,69	14,00	0	3,43	0,96	0	0,87	1,82
		x=7,5	-4,97	3,36	12,41	4,46	0,23	1,12	1,13	2,43
	20	x=0	-24,19	14,28	0	3,42	1,12	0	0,87	2,01
		x=7,5	-5,81	3,43	12,41	4,45	0,27	1,12	1,13	2,46
	15	x=0	-29,10	14,68	0	3,41	1,35	0	0,86	2,29
		x=7,5	-6,98	3,52	12,41	4,43	0,32	1,12	1,21	2,51
20	30	x=0	-18,35	16,56	0	3,43	0,85	0	0,87	1,69
		x=7,5	-4,41	3,98	12,98	4,46	0,21	1,17	1,13	2,46
	25	x=0	-21,03	16,82	0	3,42	0,98	0	0,87	1,84
		x=7,5	-5,05	4,04	12,98	4,45	0,23	1,17	1,13	2,48
	20	x=0	-24,61	17,17	0	3,41	1,14	0	0,86	2,03
		x=7,5	-5,90	4,12	12,98	4,43	0,27	1,17	1,12	2,52
	15	x=0	-29,62	17,67	0	3,40	1,38	0	0,86	2,32
		x=7,5	-7,09	4,23	12,98	4,42	0,33	1,17	1,12	2,56
15	30	x=0	-18,79	20,66	0	3,42	0,87	0	0,87	1,72
		x=7,5	-4,51	4,96	13,60	4,45	0,21	1,23	1,13	2,52
	25	x=0	-21,56	20,99	0	3,41	1,00	0	0,86	1,86
		x=7,5	-5,17	5,03	13,60	4,43	0,24	1,23	1,12	2,54
	20	x=0	-25,26	21,45	0	3,40	1,17	0	0,86	2,07
		x=7,5	-6,05	5,14	13,60	4,42	0,28	1,23	1,12	2,58
	15	x=0	-30,44	22,11	0	3,39	1,42	0	0,86	2,37
		x=7,5	-7,28	5,29	13,60	4,41	0,34	1,23	1,12	2,63

Tabelle 118: Beulwerte TF1 für s=8mm in S355, mit Quersteife

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
25	30	x=0	-17,11	12,88	0	4,21	0,68	0	0,73	1,31
		x=6,5	-1,82	1,37	12,03	5,31	0,07	0,95	0,92	1,90
	25	x=0	-19,73	13,04	0	4,21	0,78	0	0,73	1,43
		x=6,5	-2,10	1,39	12,03	5,31	0,08	0,95	0,92	1,91
	20	x=0	-23,26	13,27	0	4,21	0,92	0	0,73	1,61
		x=6,5	-2,48	1,41	12,03	5,31	0,10	0,95	0,92	1,92
	15	x=0	-28,29	13,60	0	4,21	1,12	0	0,73	1,88
		x=6,5	-3,01	1,45	12,03	5,31	0,12	0,95	0,92	1,93
20	30	x=0	-17,33	15,57	0	4,21	0,69	0	0,73	1,32
		x=6,5	-1,85	1,66	12,58	5,31	0,07	1,00	0,92	1,95
	25	x=0	-20,00	15,77	0	4,21	0,79	0	0,73	1,45
		x=6,5	-2,13	1,68	12,58	5,31	0,08	1,00	0,92	1,95
	20	x=0	-23,59	16,06	0	4,21	0,93	0	0,73	1,63
		x=6,5	-2,51	1,71	12,58	5,31	0,10	1,00	0,92	1,96
	15	x=0	-28,72	16,49	0	4,21	1,14	0	0,73	1,91
		x=6,5	-3,06	1,76	12,58	5,31	0,12	1,00	0,92	1,97
15	30	x=0	-17,69	19,60	0	4,21	0,70	0	0,73	1,33
		x=6,5	-1,88	2,09	13,18	5,31	0,07	1,04	0,92	2,00
	25	x=0	-20,43	19,87	0	4,21	0,81	0	0,73	1,47
		x=6,5	-2,18	2,12	13,18	5,31	0,09	1,04	0,92	2,00
	20	x=0	-24,13	20,26	0	4,21	0,96	0	0,73	1,66
		x=6,5	-2,57	2,16	13,18	5,31	0,10	1,04	0,92	2,01
	15	x=0	-29,41	20,84	0	4,21	1,17	0	0,73	1,95
		x=6,5	-3,13	2,22	13,18	5,31	0,12	1,04	0,92	2,03

Tabelle 119: Beulwerte TF2 für s=8mm in S355, mit Quersteife

Beulwerte mit einer Quersteife + Längssteife im betrachteten Teilfeld

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
30	35	x=0	-14,82	11,31	0,00	2,31	0,68	0	0,18	0,49
		x=7,5	-3,57	2,73	7,93	3,00	0,16	0,38	0,24	0,22
	30	x=0	-16,51	11,47	0	2,30	0,76	0	0,18	0,61
		x=7,5	-3,98	2,76	7,93	2,99	0,18	0,38	0,24	0,22
	25	x=0	-18,62	11,66	0	2,29	0,85	0	0,18	0,76
		x=7,5	-4,48	2,81	7,93	2,98	0,21	0,38	0,24	0,22
	20	x=0	-21,33	11,92	0	2,29	0,98	0	0,18	0,99
		x=7,5	-5,13	2,86	7,93	2,97	0,23	0,38	0,24	0,22
	25	x=0	-15,03	13,06	0	2,30	0,69	0	0,18	0,51
		x=7,5	-3,62	3,15	8,28	2,99	0,17	0,40	0,24	0,23
		x=0	-16,76	13,25	0	2,29	0,77	0	0,18	0,62
		x=7,5	-4,03	3,19	8,28	2,98	0,18	0,40	0,24	0,23
		x=0	-18,91	13,48	0	2,29	0,87	0	0,18	0,78
		x=7,5	-4,54	3,24	8,28	2,97	0,21	0,40	0,24	0,23
20	35	x=0	-21,67	13,80	0	2,28	0,99	0	0,18	1,02
		x=7,5	-5,20	3,31	8,28	2,96	0,24	0,40	0,24	0,23
	30	x=0	-15,34	15,43	0	2,29	0,70	0	0,18	0,53
		x=7,5	-3,69	3,71	8,65	2,98	0,17	0,42	0,24	0,24
	30	x=0	-17,10	15,66	0	2,29	0,78	0	0,18	0,65
		x=7,5	-4,11	3,76	8,65	2,97	0,19	0,42	0,24	0,24
	25	x=0	-19,31	15,95	0	2,28	0,89	0	0,18	0,82
		x=7,5	-4,64	3,83	8,65	2,96	0,21	0,42	0,24	0,24
	20	x=0	-22,16	16,33	0	2,27	1,02	0	0,18	1,06
		x=7,5	-5,31	3,92	8,65	2,96	0,24	0,42	0,23	0,25
15	35	x=0	-15,78	18,80	0	2,29	0,72	0	0,18	0,56
		x=7,5	-3,79	4,52	9,06	2,97	0,17	0,44	0,24	0,26
	30	x=0	-17,62	19,09	0	2,28	0,81	0	0,18	0,68
		x=7,5	-4,23	4,58	9,06	2,96	0,19	0,44	0,24	0,26
	25	x=0	-19,91	19,47	0	2,27	0,91	0	0,18	0,87
		x=7,5	-4,77	4,67	9,06	2,96	0,22	0,44	0,23	0,26
	20	x=0	-22,87	19,96	0	2,27	1,05	0	0,18	1,13
		x=7,5	-5,48	4,78	9,06	2,95	0,25	0,44	0,23	0,26

Tabelle 120: Beulwerte TF1 für s=12mm in S235, mit Quer- und Längssteife

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
30	35	x=0	-14,13	10,60	0	2,81	0,65	0	0,22	0,47
		x=6,5	-1,50	1,13	7,69	3,54	0,07	0,37	0,28	0,23
	30	x=0	-15,83	10,72	0	2,81	0,73	0	0,22	0,58
		x=6,5	-1,69	1,14	7,69	3,54	0,08	0,37	0,28	0,22
	25	x=0	-17,98	10,88	0	2,81	0,82	0	0,22	0,73
		x=6,5	-1,92	1,16	7,69	3,54	0,09	0,37	0,28	0,22
	20	x=0	-20,79	11,10	0	2,81	0,95	0	0,22	0,96
		x=6,5	-2,22	1,18	7,69	3,54	0,10	0,37	0,28	0,22
25	35	x=0	-14,30	12,31	0	2,81	0,66	0	0,22	0,48
		x=6,5	-1,52	1,31	8,02	3,54	0,07	0,38	0,28	0,24
	30	x=0	-16,03	12,47	0	2,81	0,73	0	0,22	0,59
		x=6,5	-1,71	1,33	8,02	3,54	0,08	0,38	0,28	0,24
	25	x=0	-18,22	12,67	0	2,81	0,84	0	0,22	0,75
		x=6,5	-1,94	1,35	8,02	3,54	0,09	0,38	0,28	0,23
	20	x=0	-21,08	12,93	0	2,81	0,97	0	0,22	0,98
		x=6,5	-2,25	1,38	8,02	3,54	0,10	0,38	0,28	0,23
20	35	x=0	-14,54	14,66	0	2,81	0,67	0	0,22	0,49
		x=6,5	-1,55	1,56	8,38	3,54	0,07	0,40	0,28	0,25
	30	x=0	-16,32	14,85	0	2,81	0,75	0	0,22	0,61
		x=6,5	-1,74	1,58	8,38	3,54	0,08	0,40	0,28	0,25
	25	x=0	-18,56	15,10	0	2,81	0,85	0	0,22	0,77
		x=6,5	-1,98	1,61	8,38	3,54	0,09	0,40	0,28	0,25
	20	x=0	-21,50	15,44	0	2,81	0,99	0	0,22	1,02
		x=6,5	-2,29	1,64	8,38	3,54	0,10	0,40	0,28	0,25
15	35	x=0	-14,92	18,06	0	2,81	0,68	0	0,22	0,52
		x=6,5	-1,59	1,92	8,78	3,54	0,07	0,42	0,28	0,27
	30	x=0	-16,76	18,31	0	2,81	0,77	0	0,22	0,64
		x=6,5	-1,79	1,95	8,78	3,54	0,08	0,42	0,28	0,26
	25	x=0	-19,08	18,63	0	2,81	0,87	0	0,22	0,81
		x=6,5	-2,03	1,98	8,78	3,54	0,09	0,42	0,28	0,26
	20	x=0	-22,12	19,07	0	2,81	1,01	0	0,22	1,08
		x=6,5	-2,36	2,03	8,78	3,54	0,11	0,42	0,28	0,26

Tabelle 121: Beulwerte TF2 für s=12mm in S235, mit Quer- und Längssteife

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
30	35	x=0	-15,31	11,50	0	2,77	0,70	0	0,22	0,54
		x=7,5	-3,69	2,77	9,52	3,60	0,17	0,47	0,29	0,33
	30	x=0	-17,15	11,64	0	2,76	0,79	0	0,22	0,67
		x=7,5	-4,13	2,80	9,52	3,59	0,19	0,47	0,29	0,33
	25	x=0	-19,48	11,82	0	2,75	0,89	0	0,22	0,85
		x=7,5	-4,69	2,84	9,52	3,58	0,21	0,47	0,28	0,33
25	35	x=0	-15,51	13,35	0	2,76	0,71	0	0,22	0,55
		x=7,5	-3,74	3,22	9,93	3,59	0,17	0,49	0,29	0,35
	30	x=0	-17,38	13,52	0	2,75	0,80	0	0,22	0,68
		x=7,5	-4,18	3,25	9,93	3,58	0,19	0,49	0,28	0,35
	25	x=0	-19,75	13,75	0	2,74	0,91	0	0,22	0,87
		x=7,5	-4,75	3,30	9,93	3,57	0,22	0,49	0,28	0,35
20	35	x=0	-15,78	15,89	0	2,75	0,72	0	0,22	0,57
		x=7,5	-3,80	3,82	10,38	3,58	0,17	0,51	0,28	0,37
	30	x=0	-17,70	16,10	0	2,74	0,81	0	0,22	0,71
		x=7,5	-4,25	3,87	10,38	3,57	0,19	0,51	0,28	0,37
	25	x=0	-20,13	16,38	0	2,74	0,92	0	0,22	0,90
		x=7,5	-4,83	3,93	10,38	3,56	0,22	0,51	0,28	0,37
15	35	x=0	-16,20	19,57	0	2,74	0,74	0	0,22	0,60
		x=7,5	-3,89	4,70	10,88	3,57	0,18	0,54	0,28	0,39
	30	x=0	-18,19	19,84	0	2,74	0,83	0	0,22	0,74
		x=7,5	-4,37	4,76	10,88	3,56	0,20	0,54	0,28	0,39
	25	x=0	-20,71	20,20	0	2,73	0,95	0	0,22	0,95
		x=7,5	-4,96	4,84	10,88	3,55	0,23	0,54	0,28	0,39

Tabelle 122: Beulwerte TF1 für s=10mm in S235, mit Quer- und Längssteife

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
30	35	x=0	-14,53	10,74	0	3,37	0,67	0	0,27	0,52
		x=6,5	-1,55	1,14	9,22	4,25	0,07	0,45	0,34	0,34
	30	x=0	-16,37	10,85	0	3,37	0,75	0	0,27	0,63
		x=6,5	-1,74	1,16	9,22	4,25	0,08	0,45	0,34	0,34
	25	x=0	-18,72	10,99	0	3,37	0,86	0	0,27	0,81
		x=6,5	-1,99	1,17	9,22	4,25	0,09	0,45	0,34	0,34
25	35	x=0	-14,68	12,54	0	3,37	0,67	0	0,27	0,52
		x=6,5	-1,56	1,34	9,62	4,25	0,07	0,47	0,34	0,36
	30	x=0	-16,55	12,68	0	3,37	0,76	0	0,27	0,67
		x=6,5	-1,76	1,35	9,62	4,25	0,08	0,47	0,34	0,36
	25	x=0	-18,94	12,86	0	3,37	0,87	0	0,27	0,82
		x=6,5	-2,02	1,37	9,62	4,25	0,09	0,47	0,34	0,36
20	35	x=0	-14,90	15,03	0	3,37	0,68	0	0,27	0,54
		x=6,5	-1,59	1,60	10,06	4,25	0,07	0,49	0,34	0,38
	30	x=0	-16,81	15,20	0	3,37	0,77	0	0,27	0,67
		x=6,5	-1,79	1,62	10,06	4,25	0,08	0,49	0,34	0,38
	25	x=0	-19,25	15,43	0	3,37	0,88	0	0,27	0,85
		x=6,5	-2,05	1,64	10,06	4,25	0,09	0,49	0,34	0,38
15	35	x=0	-15,25	18,70	0	3,37	0,70	0	0,27	0,56
		x=6,5	-1,62	1,99	10,54	4,25	0,07	0,51	0,34	0,40
	30	x=0	-17,22	18,93	0	3,37	0,79	0	0,27	0,69
		x=6,5	-1,83	2,02	10,54	4,25	0,08	0,51	0,34	0,40
	25	x=0	-19,73	19,23	0	3,37	0,90	0	0,27	0,89
		x=6,5	-2,10	2,05	10,54	4,25	0,10	0,51	0,34	0,40

Tabelle 123: Beulwerte TF2 für s=10mm in S235, mit Quer- und Längssteife

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
30	35	x=0	-15,85	11,68	0	3,46	0,75	0	0,28	0,66
		x=7,5	-3,82	2,82	11,90	4,50	0,18	0,66	0,36	0,70
	30	x=0	-17,87	11,81	0	3,45	0,84	0	0,28	0,80
		x=7,5	-4,30	2,84	11,90	4,49	0,20	0,66	0,36	0,70
	25	x=0	-20,46	11,97	0	3,44	0,97	0	0,27	1,02
		x=7,5	-4,92	2,88	11,90	4,47	0,23	0,66	0,36	0,71
25	35	x=0	-16,01	13,65	0	3,45	0,76	0	0,28	0,67
		x=7,5	-3,86	3,29	12,41	4,49	0,18	0,69	0,36	0,73
	30	x=0	-18,06	13,80	0	3,44	0,85	0	0,27	0,82
		x=7,5	-4,35	3,32	12,41	4,47	0,20	0,69	0,36	0,74
	25	x=0	-20,69	14,00	0	3,43	0,98	0	0,27	1,04
		x=7,5	-4,97	3,36	12,41	4,46	0,23	0,69	0,35	0,74
20	35	x=0	-16,26	16,37	0	3,44	0,77	0	0,27	0,69
		x=7,5	-3,91	3,94	12,98	4,47	0,18	0,72	0,36	0,77
	30	x=0	-18,35	16,56	0	3,43	0,87	0	0,27	0,84
		x=7,5	-4,41	3,98	12,98	4,46	0,20	0,72	0,35	0,77
	25	x=0	-21,03	16,82	0	3,42	0,99	0	0,27	1,06
		x=7,5	-5,05	4,04	12,98	4,45	0,23	0,72	0,35	0,78
15	35	x=0	-16,63	20,41	0	3,43	0,78	0	0,27	0,71
		x=7,5	-4,00	4,90	13,60	4,46	0,19	0,76	0,35	0,81
	30	x=0	-18,79	20,66	0	3,42	0,89	0	0,27	0,88
		x=7,5	-4,51	4,96	13,60	4,45	0,21	0,76	0,35	0,81
	25	x=0	-21,56	20,99	0	3,41	1,02	0	0,27	1,11
		x=7,5	-5,17	5,03	13,60	4,43	0,24	0,76	0,35	0,82

Tabelle 124: Beulwerte TF1 für s=8mm in S235, mit Quer- und Längssteife

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
30	35	x=0	-14,97	10,87	0	4,21	0,69	0	0,33	0,58
		x=6,5	-1,59	1,16	11,53	5,31	0,07	0,58	0,42	0,57
	30	x=0	-16,96	10,97	0	4,21	0,78	0	0,33	0,72
		x=6,5	-1,81	1,17	11,53	5,31	0,08	0,58	0,42	0,57
	25	x=0	-19,54	11,09	0	4,21	0,90	0	0,33	0,91
		x=6,5	-2,08	1,18	11,53	5,31	0,10	0,58	0,42	0,57
25	35	x=0	-15,09	12,77	0	4,21	0,69	0	0,33	0,59
		x=6,5	-1,61	1,36	12,03	5,31	0,07	0,60	0,42	0,60
	30	x=0	-17,11	12,88	0	4,21	0,78	0	0,33	0,73
		x=6,5	-1,82	1,37	12,03	5,31	0,08	0,60	0,42	0,60
	25	x=0	-19,73	13,04	0	4,21	0,90	0	0,33	0,93
		x=6,5	-2,10	1,39	12,03	5,31	0,10	0,60	0,42	0,59
20	35	x=0	-15,28	15,41	0	4,21	0,70	0	0,33	0,60
		x=6,5	-1,63	1,64	12,58	5,31	0,07	0,63	0,42	0,63
	30	x=0	-17,33	15,57	0	4,21	0,79	0	0,33	0,74
		x=6,5	-1,85	1,66	12,58	5,31	0,08	0,63	0,42	0,63
	25	x=0	-20,00	15,77	0	4,21	0,92	0	0,33	0,95
		x=6,5	-2,13	1,68	12,58	5,31	0,10	0,63	0,42	0,63
15	35	x=0	-15,58	19,39	0	4,21	0,71	0	0,33	0,62
		x=6,5	-1,66	2,07	13,18	5,31	0,08	0,66	0,42	0,67
	30	x=0	-17,69	19,60	0	4,21	0,81	0	0,33	0,77
		x=6,5	-1,88	2,09	13,18	5,31	0,09	0,66	0,42	0,66
	25	x=0	-20,43	19,87	0	4,21	0,94	0	0,33	0,99
		x=6,5	-2,18	2,12	13,18	5,31	0,10	0,66	0,42	0,66

Tabelle 125: Beulwerte TF2 für s=8mm in S235, mit Quer- und Längssteife

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
25	30	x=0	-17,38	13,52	0	2,75	0,54	0	0,15	0,32
		x=7,5	-4,18	3,25	9,93	3,58	0,13	0,36	0,19	0,17
	25	x=0	-19,75	13,75	0	2,74	0,61	0	0,15	0,41
		x=7,5	-4,75	3,30	9,93	3,57	0,15	0,36	0,19	0,27
	20	x=0	-22,85	14,05	0	2,74	0,71	0	0,14	0,53
		x=7,5	-5,48	3,37	9,93	3,56	0,17	0,36	0,19	0,28
	15	x=0	-27,07	14,46	0	2,73	0,84	0	0,14	0,73
		x=7,5	-6,49	3,47	9,93	3,55	0,20	0,36	0,19	0,29
20	30	x=0	-17,70	16,10	0	2,74	0,55	0	0,15	0,33
		x=7,5	-4,25	3,87	10,38	3,57	0,13	0,38	0,19	0,29
	25	x=0	-20,13	16,38	0	2,74	0,62	0	0,14	0,42
		x=7,5	-4,83	3,93	10,38	3,56	0,15	0,38	0,19	0,29
	20	x=0	-23,31	16,75	0	2,73	0,72	0	0,14	0,55
		x=7,5	-5,59	4,02	10,38	3,55	0,17	0,38	0,19	0,29
	15	x=0	-27,64	17,27	0	2,72	0,86	0	0,14	0,76
		x=7,5	-6,62	4,14	10,38	3,54	0,20	0,38	0,19	0,30
15	30	x=0	-18,19	19,84	0	2,74	0,56	0	0,14	0,35
		x=7,5	-4,37	4,76	10,88	3,56	0,13	0,40	0,19	0,30
	25	x=0	-20,71	20,20	0	2,73	0,64	0	0,14	0,44
		x=7,5	-4,96	4,84	10,88	3,55	0,15	0,40	0,19	0,31
	20	x=0	-24,00	20,69	0	2,72	0,74	0	0,14	0,58
		x=7,5	-5,75	4,95	10,88	3,54	0,18	0,40	0,19	0,31
	15	x=0	-28,50	21,36	0	2,71	0,88	0	0,14	0,81
		x=7,5	-6,82	5,11	10,88	3,52	0,21	0,40	0,19	0,32

Tabelle 126: Beulwerte TF1 für s=10mm in S235, mit Quer- und Längssteife

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
25	30	x=0	-16,55	12,68	0	3,37	0,51	0	0,18	0,29
		x=6,5	-1,76	1,35	9,62	4,25	0,05	0,32	0,22	0,19
	25	x=0	-18,94	12,86	0	3,37	0,58	0	0,18	0,37
		x=6,5	-2,02	1,37	9,62	4,25	0,06	0,32	0,22	0,19
	20	x=0	-22,10	13,11	0	3,37	0,68	0	0,18	0,49
		x=6,5	-2,35	1,40	9,62	4,25	0,07	0,32	0,22	0,19
	15	x=0	-26,51	13,47	0	3,37	0,81	0	0,18	0,69
		x=6,5	-2,82	1,44	9,62	4,25	0,09	0,32	0,22	0,19
20	30	x=0	-16,81	15,20	0	3,37	0,51	0	0,18	0,30
		x=6,5	-1,79	1,62	10,06	4,25	0,05	0,34	0,22	0,21
	25	x=0	-19,25	15,43	0	3,37	0,59	0	0,18	0,38
		x=6,5	-2,05	1,64	10,06	4,25	0,06	0,34	0,22	0,20
	20	x=0	-22,48	15,75	0	3,37	0,69	0	0,18	0,50
		x=6,5	-2,40	1,68	10,06	4,25	0,07	0,34	0,22	0,20
	15	x=0	-26,99	16,21	0	3,37	0,82	0	0,18	0,71
		x=6,5	-2,88	1,73	10,06	4,25	0,09	0,34	0,22	0,20
15	30	x=0	-17,22	18,93	0	3,37	0,53	0	0,18	0,31
		x=6,5	-1,83	2,02	10,54	4,25	0,06	0,35	0,22	0,22
	25	x=0	-19,73	19,23	0	3,37	0,60	0	0,18	0,40
		x=6,5	-2,10	2,05	10,54	4,25	0,06	0,35	0,22	0,22
	20	x=0	-23,08	19,65	0	3,37	0,71	0	0,18	0,53
		x=6,5	-2,46	2,09	10,54	4,25	0,08	0,35	0,22	0,22
	15	x=0	-27,74	20,26	0	3,37	0,85	0	0,18	0,75
		x=6,5	-2,95	2,16	10,54	4,25	0,09	0,35	0,22	0,22

Tabelle 127: Beulwerte TF2 für s=10mm in S355, mit Quer- und Längssteife

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
25	30	x=0	-18,06	13,80	0	3,44	0,66	0	0,22	0,64
		x=7,5	-4,35	3,32	12,41	4,47	0,16	0,54	0,24	0,56
	25	x=0	-20,69	14,00	0	3,43	0,76	0	0,22	0,76
		x=7,5	-4,97	3,36	12,41	4,46	0,18	0,54	0,24	0,56
	20	x=0	-24,19	14,28	0	3,42	0,89	0	0,22	0,93
		x=7,5	-5,81	3,43	12,41	4,45	0,21	0,54	0,24	0,57
	15	x=0	-29,10	14,68	0	3,41	1,07	0	0,22	1,20
		x=7,5	-6,98	3,52	12,41	4,43	0,25	0,54	0,23	0,58
20	30	x=0	-18,35	16,56	0	3,43	0,67	0	0,22	0,65
		x=7,5	-4,41	3,98	12,98	4,46	0,16	0,56	0,24	0,58
	25	x=0	-21,03	16,82	0	3,42	0,77	0	0,22	0,78
		x=7,5	-5,05	4,04	12,98	4,45	0,18	0,56	0,24	0,59
	20	x=0	-24,61	17,17	0	3,41	0,90	0	0,22	0,96
		x=7,5	-5,90	4,12	12,98	4,43	0,21	0,56	0,23	0,59
	15	x=0	-29,62	17,67	0	3,40	1,09	0	0,22	1,23
		x=7,5	-7,09	4,23	12,98	4,42	0,26	0,56	0,23	0,60
15	30	x=0	-18,79	20,66	0	3,42	0,69	0	0,22	0,67
		x=7,5	-4,51	4,96	13,60	4,45	0,16	0,59	0,24	0,61
	25	x=0	-21,56	20,99	0	3,41	0,79	0	0,22	0,80
		x=7,5	-5,17	5,03	13,60	4,43	0,19	0,59	0,23	0,61
	20	x=0	-25,26	21,45	0	3,40	0,93	0	0,22	0,99
		x=7,5	-6,05	5,14	13,60	4,42	0,22	0,59	0,23	0,62
	15	x=0	-30,44	22,11	0	3,39	1,12	0	0,22	1,27
		x=7,5	-7,28	5,29	13,60	4,41	0,26	0,59	0,23	0,63

Tabelle 128: Beulwerte TF1 für s=8mm in S355, mit Quer- und Längssteife

Dicke [mm]		LS [m]	Einwirkungen [kN/cm ²]				Einzelnachweise			INW
t_{UG}	t_{OG}		$\sigma_{x,1}$	$\sigma_{x,2}$	σ_y	τ	$\sigma_x / \sigma_{x,P,R,d}$	$\sigma_y / \sigma_{y,P,R,d}$	$\tau / \tau_{P,R,d}$	
25	30	x=0	-17,11	12,88	0	4,21	0,54	0	0,23	0,38
		x=6,5	-1,82	1,37	12,03	5,31	0,06	0,45	0,28	0,41
	25	x=0	-19,73	13,04	0	4,21	0,62	0	0,23	0,47
		x=6,5	2,10	1,39	12,03	5,31	0,06	0,45	0,28	0,41
	20	x=0	-23,26	13,27	0	4,21	0,74	0	0,23	0,62
		x=6,5	-2,48	1,41	12,03	5,31	0,08	0,45	0,28	0,41
	15	x=0	-28,29	13,60	0	4,21	0,90	0	0,23	0,87
		x=6,5	-3,01	1,45	12,03	5,31	0,09	0,45	0,28	0,41
20	30	x=0	-17,33	15,57	0	4,21	0,55	0	0,23	0,38
		x=6,5	-1,85	1,66	12,58	5,31	0,06	0,47	0,28	0,43
	25	x=0	-20,00	15,77	0	4,21	0,63	0	0,23	0,48
		x=6,5	-2,13	1,68	12,58	5,31	0,07	0,47	0,28	0,43
	20	x=0	-23,59	16,06	0	4,21	0,75	0	0,23	0,64
		x=6,5	2,51	1,71	12,58	5,31	0,08	0,47	0,28	0,43
	15	x=0	-28,72	16,49	0	4,21	0,91	0	0,23	0,90
		x=6,5	-3,06	1,76	12,58	5,31	0,09	0,47	0,28	0,43
15	30	x=0	-17,69	19,60	0	4,21	0,56	0	0,23	0,40
		x=6,5	-1,88	2,09	13,18	5,31	0,06	0,49	0,28	0,45
	25	x=0	-20,43	19,87	0	4,21	0,65	0	0,23	0,50
		x=6,5	-2,18	2,12	13,18	5,31	0,07	0,49	0,28	0,45
	20	x=0	-24,13	20,26	0	4,21	0,76	0	0,23	0,66
		x=6,5	-2,57	2,16	13,18	5,31	0,08	0,49	0,28	0,45
	15	x=0	-29,41	20,84	0	4,21	0,93	0	0,23	0,93
		x=6,5	-3,13	2,22	13,18	5,31	0,10	0,49	0,28	0,45

Tabelle 129: Beulwerte TF2 für s=8mm in S355, mit Quer- und Längssteife

Interpolation und Zusammenfassung

Entsprechend dem Verhältnis der Aufdickungslänge werden die Beulwerte linear interpoliert. Dies wird nur für die maßgebenden durchgeführt. Teilfeld 2 ist demzufolge nie maßgebend, weil die Aufdickungslänge nicht bis dahin reicht. Die Aufdickungslänge ist der Tabelle 22 für S235 und Tabelle 23 für S355 zu entnehmen.

	Laststellung	Ergebnis Interaktionsnachweis			
		$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 35\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,48	0,50	0,52	0,55
	$x = 6,5\text{m}$	0,20	0,21	0,21	0,22
	$x = 7,5\text{m}$	0,20	0,20	0,21	0,22
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,58	0,60	0,62	0,66
	$x = 6,5\text{m}$	0,21	0,21	0,22	0,23
	$x = 7,5\text{m}$	0,20	0,20	0,21	0,22
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,69	0,71	0,74	0,78
	$x = 6,5\text{m}$	0,22	0,22	0,23	0,24
	$x = 7,5\text{m}$	0,20	0,21	0,21	0,22
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,81	0,84	0,87	0,93
	$x = 6,5\text{m}$	0,23	0,24	0,25	0,26
	$x = 7,5\text{m}$	0,20	0,21	0,22	0,23

Tabelle 130: Interpolierte Beulwerte für $s=15\text{mm}$ in S235, unversteift

	Laststellung	Ergebnis Interaktionsnachweis			
		$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 35\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,64	0,65	0,67	0,70
	$x = 6,5\text{m}$	0,42	0,43	0,44	0,46
	$x = 7,5\text{m}$	0,43	0,44	0,45	0,47
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,74	0,75	0,78	0,81
	$x = 6,5\text{m}$	0,43	0,44	0,45	0,47
	$x = 7,5\text{m}$	0,43	0,44	0,45	0,47
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,87	0,89	0,93	0,98
	$x = 6,5\text{m}$	0,44	0,45	0,46	0,48
	$x = 7,5\text{m}$	0,43	0,44	0,45	0,47
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,96	0,99	1,02	1,08
	$x = 6,5\text{m}$	0,44	0,46	0,47	0,49
	$x = 7,5\text{m}$	0,43	0,44	0,46	0,47

Tabelle 131: Interpolierte Beulwerte für $s=12\text{mm}$ in S235, unversteift

	Laststellung	Ergebnis Interaktionsnachweis			
		$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 35\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,97	0,98	1,00	1,03
	$x = 6,5\text{m}$	0,85	0,87	0,89	0,91
	$x = 7,5\text{m}$	0,86	0,88	0,90	0,92
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,09	1,10	1,13	1,16
	$x = 6,5\text{m}$	0,86	0,88	0,90	0,91
	$x = 7,5\text{m}$	0,86	0,88	0,90	0,92
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,23	1,25	1,28	1,33
	$x = 6,5\text{m}$	0,88	0,90	0,92	0,94
	$x = 7,5\text{m}$	0,86	0,88	0,90	0,93
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	-	-	-	-
	$x = 6,5\text{m}$	-	-	-	-
	$x = 7,5\text{m}$	-	-	-	-

Tabelle 132: Interpolierte Beulwerte für $s=10\text{mm}$ in S235, unversteift

	Laststellung	Ergebnis Interaktionsnachweis			
		$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 35\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,78	1,79	1,81	1,84
	$x = 6,5\text{m}$	1,83	1,86	1,89	1,93
	$x = 7,5\text{m}$	1,81	1,84	1,87	1,91
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,92	1,93	1,95	1,99
	$x = 6,5\text{m}$	1,86	1,89	1,93	1,97
	$x = 7,5\text{m}$	1,82	1,85	1,89	1,93
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	2,10	2,11	2,14	2,18
	$x = 6,5\text{m}$	1,90	1,94	1,97	2,02
	$x = 7,5\text{m}$	1,84	1,87	1,91	1,95
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	-	-	-	-
	$x = 6,5\text{m}$	-	-	-	-
	$x = 7,5\text{m}$	-	-	-	-

Tabelle 133: Interpolierte Beulwerte für $s=8\text{mm}$ in S235, unversteift

		Laststellung	Ergebnis Interaktionsnachweis		
			$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
Stegdicke $s=12\text{mm}$	$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,55	0,56	0,58
		$x = 6,5\text{m}$	0,43	0,44	0,45
		$x = 7,5\text{m}$	0,43	0,44	0,44
	$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,63	0,64	0,66
		$x = 6,5\text{m}$	0,44	0,45	0,46
		$x = 7,5\text{m}$	0,43	0,44	0,45
	$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,74	0,76	0,79
		$x = 6,5\text{m}$	0,46	0,47	0,48
		$x = 7,5\text{m}$	0,44	0,44	0,45
	$t_{OG} = 15\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,87	0,90	0,93
		$x = 6,5\text{m}$	0,48	0,49	0,50
		$x = 7,5\text{m}$	0,44	0,45	0,46
Stegdicke $s=10\text{mm}$	$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,97	0,99	1,01
		$x = 6,5\text{m}$	0,87	0,88	0,90
		$x = 7,5\text{m}$	0,84	0,86	0,87
	$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,08	1,10	1,12
		$x = 6,5\text{m}$	0,89	0,91	0,92
		$x = 7,5\text{m}$	0,85	0,87	0,88
	$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,23	1,25	1,29
		$x = 6,5\text{m}$	0,92	0,94	0,96
		$x = 7,5\text{m}$	0,87	0,88	0,90
	$t_{OG} = 15\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,40	1,42	1,46
		$x = 6,5\text{m}$	0,96	0,98	1,00
		$x = 7,5\text{m}$	0,89	0,91	0,93
Stegdicke $s=8\text{mm}$	$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,69	1,70	1,72
		$x = 6,5\text{m}$	1,75	1,77	1,80
		$x = 7,5\text{m}$	1,71	1,73	1,76
	$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,83	1,84	1,87
		$x = 6,5\text{m}$	1,79	1,81	1,84
		$x = 7,5\text{m}$	1,73	1,75	1,78
	$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	2,01	2,03	2,07
		$x = 6,5\text{m}$	1,84	1,86	1,89
		$x = 7,5\text{m}$	1,76	1,78	1,81
	$t_{OG} = 15\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	2,22	2,25	2,29
		$x = 6,5\text{m}$	1,89	1,92	1,96
		$x = 7,5\text{m}$	1,80	1,83	1,86

Tabelle 134: Interpolierte Beulwerte S355, unversteift

		Laststellung	Ergebnis Interaktionsnachweis			
			$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
Teilfeld 1	$t_{OG} = 35\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,62	0,64	0,65	0,68
		$x = 7,5\text{m}$	0,66	0,68	0,70	0,73
	$t_{OG} = 30\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,72	0,74	0,76	0,79
		$x = 7,5\text{m}$	0,66	0,68	0,71	0,73
	$t_{OG} = 25\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,83	0,85	0,87	0,92
		$x = 7,5\text{m}$	0,67	0,69	0,71	0,74
	$t_{OG} = 20\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,78	0,80	0,83	0,87
		$x = 7,5\text{m}$	0,67	0,69	0,71	0,74
Teilfeld 2	$t_{OG} = 35\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,55	0,56	0,57	0,60
		$x = 6,5\text{m}$	0,53	0,54	0,57	0,59
	$t_{OG} = 30\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,65	0,67	0,69	0,72
		$x = 6,5\text{m}$	0,53	0,55	0,57	0,59
	$t_{OG} = 25\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,81	0,83	0,85	0,89
		$x = 6,5\text{m}$	0,54	0,55	0,57	0,59
	$t_{OG} = 20\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,04	1,06	1,10	1,16
		$x = 6,5\text{m}$	0,53	0,55	0,57	0,59

Tabelle 135: Interpolierte Beulwerte für $s=12\text{mm}$ in S235, mit Quersteife

		Laststellung	Ergebnis Interaktionsnachweis			
			$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
Teilfeld 1	$t_{OG} = 35\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,00	1,01	1,03	1,06
		$x = 7,5\text{m}$	1,22	1,25	1,28	1,32
	$t_{OG} = 30\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,10	1,12	1,14	1,17
		$x = 7,5\text{m}$	1,22	1,26	1,29	1,33
	$t_{OG} = 25\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,21	1,22	1,25	1,29
		$x = 7,5\text{m}$	1,23	1,26	1,29	1,34
	$t_{OG} = 20\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	-	-	-	-
		$x = 7,5\text{m}$	-	-	-	-
Teilfeld 2	$t_{OG} = 35\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,72	0,73	0,74	0,76
		$x = 6,5\text{m}$	0,96	0,99	1,02	1,05
	$t_{OG} = 30\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,84	0,85	0,87	0,90
		$x = 6,5\text{m}$	0,96	0,99	1,02	1,05
	$t_{OG} = 25\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,01	1,03	1,05	1,09
		$x = 6,5\text{m}$	0,96	0,99	1,02	1,06
	$t_{OG} = 20\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	-	-	-	-
		$x = 6,5\text{m}$	-	-	-	-

Tabelle 136: Interpolierte Beulwerte für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quersteife

		Laststellung	Ergebnis Interaktionsnachweis			
			$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
Teilfeld 1	$t_{OG} = 35\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,78	1,79	1,81	1,83
		$x = 7,5\text{m}$	2,44	2,49	2,54	2,61
	$t_{OG} = 30\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,90	1,91	1,93	1,97
		$x = 7,5\text{m}$	2,46	2,51	2,56	2,63
	$t_{OG} = 25\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	2,07	2,08	2,11	2,14
		$x = 7,5\text{m}$	2,47	2,52	2,58	2,65
	$t_{OG} = 20\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	-	-	-	-
		$x = 7,5\text{m}$	-	-	-	-
Teilfeld 2	$t_{OG} = 35\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,32	1,33	1,34	1,37
		$x = 6,5\text{m}$	1,91	1,96	2,01	2,06
	$t_{OG} = 30\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,47	1,48	1,50	1,53
		$x = 6,5\text{m}$	1,91	1,96	2,01	2,07
	$t_{OG} = 25\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,68	1,69	1,71	1,75
		$x = 6,5\text{m}$	1,92	1,97	2,02	2,07
	$t_{OG} = 20\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	-	-	-	-
		$x = 6,5\text{m}$	-	-	-	-

Tabelle 137: Interpolierte Beulwerte für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quersteife

		Laststellung	Ergebnis Interaktionsnachweis		
			$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
Teilfeld 1	$t_{OG} = 30\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,99	1,01	1,03
		$x = 7,5\text{m}$	1,25	1,28	1,31
	$t_{OG} = 25\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,10	1,12	1,15
		$x = 7,5\text{m}$	1,26	1,29	1,33
	$t_{OG} = 20\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,26	1,28	1,31
		$x = 7,5\text{m}$	1,28	1,31	1,35
	$t_{OG} = 15\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,35	1,37	1,41
		$x = 7,5\text{m}$	1,29	1,32	1,36
Teilfeld 2	$t_{OG} = 30\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,67	0,68	0,69
		$x = 6,5\text{m}$	0,94	0,97	0,99
	$t_{OG} = 25\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,76	0,77	0,79
		$x = 6,5\text{m}$	0,94	0,97	1,00
	$t_{OG} = 20\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,90	0,92	0,94
		$x = 6,5\text{m}$	0,95	0,97	1,00
	$t_{OG} = 15\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,11	1,14	1,18
		$x = 6,5\text{m}$	0,95	0,98	1,00

Tabelle 138: Interpolierte Beulwerte für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quersteife

		Laststellung	Ergebnis Interaktionsnachweis		
			$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
Teilfeld 1	$t_{OG} = 30\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,68	1,69	1,72
		$x = 7,5\text{m}$	2,41	2,46	2,52
	$t_{OG} = 25\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,82	1,84	1,86
		$x = 7,5\text{m}$	2,43	2,48	2,54
	$t_{OG} = 20\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	2,01	2,03	2,07
		$x = 7,5\text{m}$	2,46	2,52	2,58
	$t_{OG} = 15\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	2,12	2,15	2,19
		$x = 7,5\text{m}$	2,48	2,54	2,61
Teilfeld 2	$t_{OG} = 30\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,31	1,32	1,33
		$x = 6,5\text{m}$	1,90	1,95	2,00
	$t_{OG} = 25\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,43	1,45	1,47
		$x = 6,5\text{m}$	1,91	1,95	2,00
	$t_{OG} = 20\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,61	1,63	1,66
		$x = 6,5\text{m}$	1,92	1,96	2,01
	$t_{OG} = 15\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	1,88	1,91	1,95
		$x = 6,5\text{m}$	1,93	1,97	2,03

Tabelle 139: Interpolierte Beulwerte für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quersteife

		Laststellung	Ergebnis Interaktionsnachweis			
			$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
Teilfeld 1	$t_{OG} = 35\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,49	0,51	0,53	0,56
		$x = 7,5\text{m}$	0,22	0,23	0,24	0,26
	$t_{OG} = 30\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,59	0,61	0,64	0,67
		$x = 7,5\text{m}$	0,22	0,23	0,24	0,26
	$t_{OG} = 25\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,69	0,72	0,75	0,80
		$x = 7,5\text{m}$	0,22	0,23	0,24	0,26
	$t_{OG} = 20\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,59	0,61	0,74	0,87
		$x = 7,5\text{m}$	0,22	0,23	0,24	0,26
Teilfeld 2	$t_{OG} = 35\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,47	0,48	0,49	0,52
		$x = 6,5\text{m}$	0,23	0,24	0,25	0,27
	$t_{OG} = 30\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,58	0,59	0,61	0,64
		$x = 6,5\text{m}$	0,22	0,24	0,25	0,26
	$t_{OG} = 25\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,73	0,75	0,77	0,81
		$x = 6,5\text{m}$	0,22	0,23	0,25	0,26
	$t_{OG} = 20\text{ mm}$	$x = 0\text{m}$	0,96	0,98	1,02	1,08
		$x = 6,5\text{m}$	0,22	0,23	0,25	0,26

Tabelle 140: Interpolierte Beulwerte für $s=12\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife

				Ergebnis Interaktionsnachweis			
			Laststellung	t _{UG} = 30mm	t _{UG} = 25mm	t _{UG} = 20mm	t _{UG} = 15mm
Teilfeld 1	t _{OG} = 35 mm	x = 0m	0,54	0,55	0,57	0,60	
		x = 7,5m	0,33	0,35	0,37	0,39	
	t _{OG} = 30 mm	x = 0m	0,64	0,65	0,68	0,71	
		x = 7,5m	0,33	0,35	0,37	0,39	
	t _{OG} = 25 mm	x = 0m	0,78	0,79	0,82	0,87	
		x = 7,5m	0,33	0,35	0,37	0,39	
	t _{OG} = 20 mm	x = 0m	-	-	-	-	
		x = 7,5m	-	-	-	-	
Teilfeld 2	t _{OG} = 35 mm	x = 0m	0,52	0,52	0,54	0,56	
		x = 6,5m	0,34	0,36	0,38	0,40	
	t _{OG} = 30 mm	x = 0m	0,63	0,67	0,67	0,69	
		x = 6,5m	0,34	0,36	0,38	0,40	
	t _{OG} = 25 mm	x = 0m	0,81	0,82	0,85	0,89	
		x = 6,5m	0,34	0,36	0,38	0,40	
	t _{OG} = 20 mm	x = 0m	-	-	-	-	
		x = 6,5m	-	-	-	-	

Tabelle 141: Interpolierte Beulwerte für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife

				Ergebnis Interaktionsnachweis			
			Laststellung	t _{UG} = 30mm	t _{UG} = 25mm	t _{UG} = 20mm	t _{UG} = 15mm
Teilfeld 1	t _{OG} = 35 mm	x = 0m	0,66	0,67	0,69	0,71	
		x = 7,5m	0,70	0,73	0,77	0,81	
	t _{OG} = 30 mm	x = 0m	0,77	0,78	0,80	0,84	
		x = 7,5m	0,70	0,74	0,77	0,81	
	t _{OG} = 25 mm	x = 0m	0,89	0,91	0,93	0,97	
		x = 7,5m	0,71	0,74	0,78	0,82	
	t _{OG} = 20 mm	x = 0m	-	-	-	-	
		x = 7,5m	-	-	-	-	
Teilfeld 2	t _{OG} = 35 mm	x = 0m	0,58	0,59	0,60	0,62	
		x = 6,5m	0,57	0,60	0,63	0,67	
	t _{OG} = 30 mm	x = 0m	0,72	0,73	0,74	0,77	
		x = 6,5m	0,57	0,60	0,63	0,66	
	t _{OG} = 25 mm	x = 0m	0,91	0,93	0,95	0,99	
		x = 6,5m	0,57	0,59	0,63	0,66	
	t _{OG} = 20 mm	x = 0m	-	-	-	-	
		x = 6,5m	-	-	-	-	

Tabelle 142: Interpolierte Beulwerte für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife

		Laststellung	Ergebnis Interaktionsnachweis		
			$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
Teilfeld 1	$t_{OG} = 30$ mm	$x = 0\text{m}$	0,32	0,33	0,35
		$x = 7,5\text{m}$	0,17	0,29	0,30
	$t_{OG} = 25$ mm	$x = 0\text{m}$	0,41	0,42	0,44
		$x = 7,5\text{m}$	0,27	0,29	0,31
	$t_{OG} = 20$ mm	$x = 0\text{m}$	0,53	0,55	0,58
		$x = 7,5\text{m}$	0,28	0,29	0,31
	$t_{OG} = 15$ mm	$x = 0\text{m}$	0,61	0,63	0,67
		$x = 7,5\text{m}$	0,29	0,30	0,32
Teilfeld 2	$t_{OG} = 30$ mm	$x = 0\text{m}$	0,29	0,30	0,31
		$x = 6,5\text{m}$	0,19	0,21	0,22
	$t_{OG} = 25$ mm	$x = 0\text{m}$	0,37	0,38	0,40
		$x = 6,5\text{m}$	0,19	0,20	0,22
	$t_{OG} = 20$ mm	$x = 0\text{m}$	0,49	0,50	0,53
		$x = 6,5\text{m}$	0,19	0,20	0,22
	$t_{OG} = 15$ mm	$x = 0\text{m}$	0,69	0,71	0,75
		$x = 6,5\text{m}$	0,19	0,20	0,22

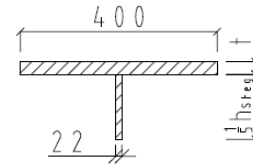
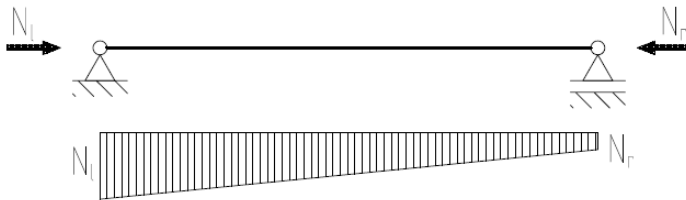
Tabelle 143: Interpolierte Beulwerte für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife

		Laststellung	Ergebnis Interaktionsnachweis		
			$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
Teilfeld 1	$t_{OG} = 30$ mm	$x = 0\text{m}$	0,64	0,65	0,67
		$x = 7,5\text{m}$	0,56	0,58	0,61
	$t_{OG} = 25$ mm	$x = 0\text{m}$	0,76	0,78	0,80
		$x = 7,5\text{m}$	0,56	0,59	0,61
	$t_{OG} = 20$ mm	$x = 0\text{m}$	0,93	0,96	0,99
		$x = 7,5\text{m}$	0,57	0,59	0,62
	$t_{OG} = 15$ mm	$x = 0\text{m}$	1,04	1,07	1,10
		$x = 7,5\text{m}$	0,58	0,60	0,63
Teilfeld 2	$t_{OG} = 30$ mm	$x = 0\text{m}$	0,38	0,38	0,40
		$x = 6,5\text{m}$	0,41	0,43	0,45
	$t_{OG} = 25$ mm	$x = 0\text{m}$	0,47	0,48	0,50
		$x = 6,5\text{m}$	0,41	0,43	0,45
	$t_{OG} = 20$ mm	$x = 0\text{m}$	0,62	0,64	0,66
		$x = 6,5\text{m}$	0,41	0,43	0,45
	$t_{OG} = 15$ mm	$x = 0\text{m}$	0,87	0,90	0,93
		$x = 6,5\text{m}$	0,41	0,45	0,45

Tabelle 144: Interpolierte Beulwerte für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife

B8 Zugehörige Berechnungen zu Kapitel 6.3.4.2

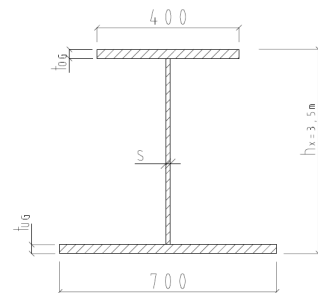
Der Biegedrillknicknachweis erfolgt in vereinfachter Form mit dem Druckgurt als Druckstab nach dem Ersatzstabverfahren. Untersucht wird das Biegedrillknickverhalten in Abhängigkeit der Obergurtdicke. Diese variiert zwischen 35mm und 15mm.



$$i_{z,g} = \sqrt{\frac{I_z}{A - 0,6 \cdot A_{\text{Steg}}}}; \bar{\lambda} = \frac{c \cdot k_c}{i_{z,g} \cdot \lambda_a}$$

κ für KSL:c mit $\bar{\lambda}$

$$\frac{0,843 \cdot M_y}{\kappa \cdot M_{pl,y,d}} \leq 1,0$$



Der Nachweis erfolgt an der Stelle $x=3,5\text{m}$ von der Schnabelspitze aus gesehen. Als Knickfigur wird der 3. Eulersche Fall zugrunde gelegt.

	Dicke des Obergurts					Einheit
	$t_{OG} = 35\text{mm}$	$t_{OG} = 30\text{mm}$	$t_{OG} = 25\text{mm}$	$t_{OG} = 20\text{mm}$	$t_{OG} = 15\text{mm}$	
Material	S 235	S 235	S 235	S 235	S 235	-
$h_{x=3,5m}$	820	820	820	820	820	mm
t_{UG}	20	20	20	20	20	mm
s	22	22	22	22	22	mm
$M_{y,x=3,5m}$	1536,5	1536,5	1536,5	1536,5	1536,5	kNm
N_l	1920	1920	1920	1920	1920	kN
N_r	22	22	22	22	22	kN
c=s_k	750	750	750	750	750	cm
$i_{z,g}$	10,37	10,20	9,98	9,67	9,21	cm
k_c	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	-
λ_a	92,93	92,93	92,93	92,93	92,93	-
λ	0,58	0,6	0,61	0,63	0,66	-
$M_{pl,y,d}$	3075	2893	2693	2475	2235	kNm
κ	0,80	0,785	0,78	0,77	0,75	-
Nachweis	0,53	0,57	0,62	0,68	0,77	-

Tabelle 145: Vereinfachter BDK-Nachweis für S235

	Dicke des Obergurtes					Einheit
	$t_{OG} = 35\text{mm}$	$t_{OG} = 30\text{mm}$	$t_{OG} = 25\text{mm}$	$t_{OG} = 20\text{mm}$	$t_{OG} = 15\text{mm}$	
Material	S 355	S 355	S 355	S 355	S 355	-
$h_{x=3,5m}$	820	820	820	820	820	mm
t_{UG}	20	20	20	20	20	mm
s	15	15	15	15	15	mm
$M_{y,x=3,5m}$	1536,5	1536,5	1536,5	1536,5	1536,5	kNm
N_l	1920	1920	1920	1920	1920	kN
N_r	22	22	22	22	22	kN
$c=s_k$	750	750	750	750	750	cm
$i_{z,g}$	10,70	10,58	10,40	10,16	9,79	cm
k_c	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	-
λ_a	75,9	75,9	75,9	75,9	75,9	-
λ	0,69	0,70	0,71	0,73	0,76	-
$M_{pl,y,d}$	4309	4029	3712	3348	2940	kNm
κ	0,73	0,725	0,72	0,705	0,69	-
Nachweis	0,41	0,44	0,48	0,55	0,64	-

Tabelle 146: Vereinfachter BDK-Nachweis für S355

Anhang C

Ergebnisse Finite Elemente Methode

C1 Zugehörige Ergebnisse zu Kapitel 6.3.1.3

Legende: ■ erfüllt ◇ nicht erfüllt ● offensichtlich erfüllt ○ offensichtlich nicht erfüllt

Dicke Untergurt [mm]	Dicke Obergurt [mm]	Dicke Steg [mm]	Spannung σ_v [kN/cm ²]	Nachweis-kriterium $\sigma_v/\sigma_{R,d}$
25	35	22	16,24	■
25	35	15	16,98	■
25	35	12	17,40	■
25	35	10	17,77	■
25	35	8	18,33	■

Tabelle 147: Spannung im Obergurt für $t_{OG}=35\text{mm}$ in S235 ohne Materialaufdickung

Dicke Untergurt [mm]	Dicke Obergurt [mm]	Dicke Steg [mm]	Spannung σ_v [kN/cm ²]	Nachweis-kriterium $\sigma_v/\sigma_{R,d}$
25	30	22	18,51	■
25	30	15	20,46	■
25	30	12	22,19	◇
25	30	10	23,26	◇
25	30	8	23,77	◇

Tabelle 148: Spannung im Obergurt für $t_{OG}=30\text{mm}$ in S235 ohne Materialaufdickung

Dicke Untergurt [mm]	Dicke Obergurt [mm]	Dicke Steg [mm]	Spannung σ_v [kN/cm ²]	Nachweis-kriterium $\sigma_v/\sigma_{R,d}$
25	25	22	24,56	◇
25	25	15	25,72	◇
25	25	12	-	○
25	25	10	-	○
25	25	8	-	○

Tabelle 149: Spannung im Obergurt für $t_{OG}=25\text{mm}$ in S235 ohne Materialaufdickung

Dicke Untergurt [mm]	Dicke Obergurt [mm]	Dicke Steg [mm]	Spannung σ_v [kN/cm ²]	Nachweis- kriterium $\sigma_v/\sigma_{R,d}$
25	30	15	19,10	■
25	30	12	19,47	■
25	30	10	19,76	■
25	30	8	20,26	■

Tabelle 150: Spannung im Obergurt für $t_{OG}=30\text{mm}$ in S355 ohne Materialaufdickung

Dicke Untergurt [mm]	Dicke Obergurt [mm]	Dicke Steg [mm]	Spannung σ_v [kN/cm ²]	Nachweis- kriterium $\sigma_v/\sigma_{R,d}$
25	25	15	21,73	■
25	25	12	22,42	■
25	25	10	23,02	■
25	25	8	23,73	■

Tabelle 151: Spannung im Obergurt für $t_{OG}=25\text{mm}$ in S355 ohne Materialaufdickung

Dicke Untergurt [mm]	Dicke Obergurt [mm]	Dicke Steg [mm]	Spannung σ_v [kN/cm ²]	Nachweis- kriterium $\sigma_v/\sigma_{R,d}$
25	20	15	25,88	■
25	20	12	26,57	■
25	20	10	27,10	■
25	20	8	27,70	■

Tabelle 152: Spannung im Obergurt für $t_{OG}=20\text{mm}$ in S355 ohne Materialaufdickung

Dicke Untergurt [mm]	Dicke Obergurt [mm]	Dicke Steg [mm]	Spannung σ_v [kN/cm ²]	Nachweis- kriterium $\sigma_v/\sigma_{R,d}$
25	15	15	31,25	■
25	15	12	32,00	■
25	15	10	-	○
25	15	8	-	○

Tabelle 153: Spannung im Obergurt für $t_{OG}=15\text{mm}$ in S355 ohne Materialaufdickung

C2 Zugehörige Ergebnisse zu Kapitel 6.3.4.1

Für die bei der FE-Analyse ermittelten Verzweigungslastfaktoren unterschiedlicher Stegdicken ist jeweils auch die Länge der Lasteinleitung und die zusätzliche Aufdickung im Stegbereich zu berücksichtigen, da dies Auswirkungen auf die entstehende Beulfigur und somit auch auf die Beulgefährdung nimmt.

Weiterhin wurden die Beulwerte für die Einwirkungsgröße von 439kN bei $x=0\text{m}$ und 615kN bei $x=10\text{m}$ ermittelt.

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{KI}			
		$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 35\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	2,40	2,48	2,60	2,77
	$x = 7,5\text{m}$	2,23	2,07	1,81	1,46
	$x = 6,5\text{m}$	2,53	2,31	1,99	1,56
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	2,25	2,33	2,45	2,62
	$x = 7,5\text{m}$	2,20	2,04	1,79	1,44
	$x = 6,5\text{m}$	2,49	2,28	1,96	1,54
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	2,01	2,10	2,21	2,37
	$x = 7,5\text{m}$	2,16	2,00	1,76	1,42
	$x = 6,5\text{m}$	2,43	2,22	1,91	1,51
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,54	1,58	1,61	1,62
	$x = 7,5\text{m}$	2,10	1,94	1,71	1,39
	$x = 6,5\text{m}$	2,33	2,13	1,81	1,46

Tabelle 154: Beulgefährdung für $s=12\text{mm}$ in S235, unversteift

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{KI}			
		$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 35\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,47	1,51	1,57	1,67
	$x = 7,5\text{m}$	1,40	1,34	1,22	1,00
	$x = 6,5\text{m}$	1,58	1,49	1,34	1,08
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,39	1,43	1,49	1,58
	$x = 7,5\text{m}$	1,39	1,32	1,21	1,00
	$x = 6,5\text{m}$	1,56	1,48	1,33	1,07
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,28	1,32	1,38	1,46
	$x = 7,5\text{m}$	1,37	1,30	1,19	0,98
	$x = 6,5\text{m}$	1,54	1,46	1,31	1,06
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,92	0,93	0,92	0,90
	$x = 7,5\text{m}$	1,34	1,27	1,16	0,96
	$x = 6,5\text{m}$	1,49	1,41	1,27	1,03

Tabelle 155: Beulgefährdung für $s=10\text{mm}$ in S235, unversteift

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{Ki}			
		$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 35\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,81	0,83	0,86	0,91
	$x = 7,5\text{m}$	0,76	0,74	0,70	0,62
	$x = 6,5\text{m}$	0,85	0,83	0,78	0,68
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,78	0,80	0,82	0,87
	$x = 7,5\text{m}$	0,75	0,73	0,70	0,61
	$x = 6,5\text{m}$	0,85	0,82	0,78	0,67
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,72	0,74	0,77	0,80
	$x = 7,5\text{m}$	0,75	0,73	0,69	0,61
	$x = 6,5\text{m}$	0,84	0,82	0,77	0,67
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,60	0,60	0,60	0,60
	$x = 7,5\text{m}$	0,73	0,72	0,68	0,60
	$x = 6,5\text{m}$	0,83	0,80	0,75	0,65

Tabelle 156: Beulgefährdung für $s=8\text{mm}$ in S235, unversteift

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{Ki}			
		$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 35\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,59	1,65	1,73	1,86
	$x = 7,5\text{m}$	2,25	2,24	2,24	2,21
	$x = 6,5\text{m}$	2,11	2,07	1,99	1,74
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,46	1,51	1,59	1,70
	$x = 7,5\text{m}$	2,21	2,20	2,20	2,18
	$x = 6,5\text{m}$	2,10	2,06	1,98	1,73
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,30	1,34	1,41	1,50
	$x = 7,5\text{m}$	2,16	2,15	2,15	2,13
	$x = 6,5\text{m}$	2,09	2,05	1,96	1,72
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,05	1,07	1,04	1,03
	$x = 7,5\text{m}$	2,11	2,11	2,11	2,09
	$x = 6,5\text{m}$	2,07	2,03	1,95	1,72

Tabelle 157: Beulgefährdung für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quersteife

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{Ki}			
		$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 35\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,81	0,84	0,87	0,92
	$x = 7,5\text{m}$	1,20	1,20	1,19	1,19
	$x = 6,5\text{m}$	1,11	1,10	1,08	1,01
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,78	0,81	0,84	0,89
	$x = 7,5\text{m}$	1,18	1,18	1,18	1,18
	$x = 6,5\text{m}$	1,11	1,10	1,07	1,01
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,74	0,76	0,80	0,85
	$x = 7,5\text{m}$	1,17	1,17	1,17	1,16
	$x = 6,5\text{m}$	1,10	1,09	1,07	1,01
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,51	0,51	0,51	0,50
	$x = 7,5\text{m}$	1,14	1,14	1,14	1,14
	$x = 6,5\text{m}$	1,09	1,08	1,06	1,00

Tabelle 158: Beulgefährdung für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quersteife

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{Ki}			
		$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 35\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	2,88	3,17	3,52	3,78
	$x = 7,5\text{m}$	2,95	2,92	2,87	2,71
	$x = 6,5\text{m}$	2,11	2,07	1,98	1,74
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	2,38	2,59	2,91	3,40
	$x = 7,5\text{m}$	2,93	2,90	2,86	2,69
	$x = 6,5\text{m}$	2,10	2,06	1,98	1,73
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,91	2,06	2,29	2,63
	$x = 7,5\text{m}$	2,90	2,88	2,83	2,68
	$x = 6,5\text{m}$	2,08	2,04	1,96	1,72
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,46	1,56	1,70	1,92
	$x = 7,5\text{m}$	2,86	2,83	2,79	2,64
	$x = 6,5\text{m}$	2,07	2,03	1,95	1,71

Tabelle 159: Beulgefährdung für $s=10\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife TF1

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{Ki}			
		$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 35\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,73	1,79	1,86	1,96
	$x = 7,5\text{m}$	1,59	1,58	1,56	1,53
	$x = 6,5\text{m}$	1,11	1,10	1,08	1,01
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,43	1,57	1,77	1,94
	$x = 7,5\text{m}$	1,58	1,57	1,56	1,52
	$x = 6,5\text{m}$	1,11	1,10	1,07	1,01
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,15	1,25	1,39	1,63
	$x = 7,5\text{m}$	1,57	1,56	1,55	1,51
	$x = 6,5\text{m}$	1,10	1,09	1,07	1,01
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,89	0,95	1,05	1,19
	$x = 7,5\text{m}$	1,55	1,55	1,53	1,50
	$x = 6,5\text{m}$	1,09	1,08	1,06	1,00

Tabelle 160: Beulgefährdung für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife TF1

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{Ki}			
		$t_{UG} = 30\text{mm}$	$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 35\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,77	1,82	1,89	1,99
	$x = 7,5\text{m}$	1,58	1,58	1,56	1,53
	$x = 6,5\text{m}$	1,40	1,38	1,34	1,24
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,76	1,81	1,88	1,98
	$x = 7,5\text{m}$	1,58	1,57	1,55	1,52
	$x = 6,5\text{m}$	1,40	1,38	1,34	1,24
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,74	1,79	1,86	1,96
	$x = 7,5\text{m}$	1,57	1,56	1,55	1,51
	$x = 6,5\text{m}$	1,40	1,38	1,34	1,24
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,48	1,53	1,55	1,56
	$x = 7,5\text{m}$	1,55	1,55	1,53	1,50
	$x = 6,5\text{m}$	1,40	1,37	1,33	1,23

Tabelle 161: Beulgefährdung für $s=8\text{mm}$ in S235, mit Quer- und Längssteife TF1/TF2

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{Ki}		
		$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	-	-	-
	$x = 7,5\text{m}$	-	-	-
	$x = 6,5\text{m}$	-	-	-
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	-	-	-
	$x = 7,5\text{m}$	-	-	-
	$x = 6,5\text{m}$	-	-	-
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,44	1,49	1,52
	$x = 7,5\text{m}$	1,77	1,53	1,25
	$x = 6,5\text{m}$	2,13	1,83	1,46
$t_{OG} = 15\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,92	0,94	0,95
	$x = 7,5\text{m}$	1,68	1,47	1,20
	$x = 6,5\text{m}$	2,00	1,73	1,39

Tabelle 162: Beulgefährdung für $s=12\text{mm}$ in S355, unversteift

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{Ki}		
		$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,49	1,58	1,72
	$x = 7,5\text{m}$	1,23	1,09	0,90
	$x = 6,5\text{m}$	1,48	1,32	1,07
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,22	1,28	1,37
	$x = 7,5\text{m}$	1,20	1,07	0,89
	$x = 6,5\text{m}$	1,46	1,30	1,05
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,91	0,94	0,98
	$x = 7,5\text{m}$	1,17	1,04	0,86
	$x = 6,5\text{m}$	1,41	1,26	1,02
$t_{OG} = 15\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,66	0,67	0,68
	$x = 7,5\text{m}$	1,12	1,00	0,83
	$x = 6,5\text{m}$	1,33	1,19	0,97

Tabelle 163: Beulgefährdung für $s=10\text{mm}$ in S355, unversteift

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{Ki}		
		$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,83	0,88	0,96
	$x = 7,5\text{m}$	0,69	0,64	0,56
	$x = 6,5\text{m}$	0,82	0,77	0,66
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,69	0,73	0,78
	$x = 7,5\text{m}$	0,68	0,64	0,55
	$x = 6,5\text{m}$	0,82	0,76	0,66
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,53	0,55	0,58
	$x = 7,5\text{m}$	0,66	0,62	0,54
	$x = 6,5\text{m}$	0,80	0,75	0,64
$t_{OG} = 15\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,40	0,41	0,40
	$x = 7,5\text{m}$	0,64	0,60	0,52
	$x = 6,5\text{m}$	0,77	0,72	0,62

Tabelle 164: Beulgefährdung für $s=8\text{mm}$ in S355, unversteift

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{Ki}		
		$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 15\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,98	0,99	1,00
	$x = 7,5\text{m}$	2,81	2,80	2,76
	$x = 6,5\text{m}$	2,74	2,79	2,39

Tabelle 165: Beulgefährdung für $s=12\text{mm}$ in S355, mit Quersteife

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{Ki}		
		$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,62	1,73	1,90
	$x = 7,5\text{m}$	1,90	1,90	1,88
	$x = 6,5\text{m}$	2,06	1,98	1,74
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,33	1,41	1,51
	$x = 7,5\text{m}$	1,85	1,85	1,83
	$x = 6,5\text{m}$	2,05	1,96	1,73
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,92	0,94	0,98
	$x = 7,5\text{m}$	1,76	1,74	1,74
	$x = 6,5\text{m}$	1,82	1,85	1,72
$t_{OG} = 15\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,72	0,74	0,77
	$x = 7,5\text{m}$	1,71	1,71	1,70
	$x = 6,5\text{m}$	1,72	1,75	1,69

Tabelle 166: Beulgefährdung für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quersteife

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{Ki}		
		$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,84	0,89	0,96
	$x = 7,5\text{m}$	1,00	1,00	1,00
	$x = 6,5\text{m}$	1,10	1,07	1,01
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,69	0,73	0,78
	$x = 7,5\text{m}$	0,98	0,98	0,98
	$x = 6,5\text{m}$	1,09	1,07	1,01
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,53	0,55	0,58
	$x = 7,5\text{m}$	0,95	0,95	0,95
	$x = 6,5\text{m}$	1,01	1,03	1,00
$t_{OG} = 15\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,43	0,45	0,48
	$x = 7,5\text{m}$	0,93	0,93	0,93
	$x = 6,5\text{m}$	0,97	0,98	0,98

Tabelle 167: Beulgefährdung für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quersteife

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{Ki}		
		$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 15\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,35	1,39	1,43
	$x = 7,5\text{m}$	4,29	4,16	3,55
	$x = 6,5\text{m}$	3,24	3,02	2,39

Tabelle 168: Beulgefährdung für $s=12\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{Ki}		
		$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	2,51	2,83	3,32
	$x = 7,5\text{m}$	2,75	2,69	2,54
	$x = 6,5\text{m}$	2,06	1,98	1,73
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,98	2,20	2,54
	$x = 7,5\text{m}$	2,72	2,67	2,52
	$x = 6,5\text{m}$	2,04	1,96	1,73
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,48	1,60	1,78
	$x = 7,5\text{m}$	2,68	2,63	2,49
	$x = 6,5\text{m}$	2,03	1,95	1,72
$t_{OG} = 15\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,92	0,96	1,00
	$x = 7,5\text{m}$	2,65	2,60	2,47
	$x = 6,5\text{m}$	1,98	1,91	1,68

Tabelle 169: Beulgefährdung für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{Ki}		
		$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,51	1,72	1,96
	$x = 7,5\text{m}$	1,48	1,47	1,43
	$x = 6,5\text{m}$	1,10	1,07	1,01
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,19	1,33	1,56
	$x = 7,5\text{m}$	1,47	1,46	1,42
	$x = 6,5\text{m}$	1,09	1,07	1,01
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,88	0,96	1,08
	$x = 7,5\text{m}$	1,45	1,44	1,40
	$x = 6,5\text{m}$	1,08	1,06	1,00
$t_{OG} = 15\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	0,57	0,60	0,65
	$x = 7,5\text{m}$	1,44	1,43	1,39
	$x = 6,5\text{m}$	1,06	1,04	0,98

Tabelle 170: Beulgefährdung für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{Ki}		
		$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	3,46	3,67	3,93
	$x = 7,5\text{m}$	2,75	2,70	2,55
	$x = 6,5\text{m}$	2,56	2,42	2,04
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	3,15	3,32	3,61
	$x = 7,5\text{m}$	2,73	2,68	2,53
	$x = 6,5\text{m}$	2,55	2,42	2,04
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	2,47	2,48	2,38
	$x = 7,5\text{m}$	2,69	2,64	2,50
	$x = 6,5\text{m}$	2,55	2,42	2,05
$t_{OG} = 15\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,56	1,61	1,66
	$x = 7,5\text{m}$	2,66	2,61	2,48
	$x = 6,5\text{m}$	2,55	2,41	2,04

Tabelle 171: Beulgefährdung für $s=10\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1/TF2

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{Ki}		
		$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 30\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,77	1,86	2,00
	$x = 7,5\text{m}$	1,49	1,47	1,43
	$x = 6,5\text{m}$	1,38	1,34	1,24
$t_{OG} = 25\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,62	1,69	1,81
	$x = 7,5\text{m}$	1,47	1,46	1,42
	$x = 6,5\text{m}$	1,38	1,34	1,24
$t_{OG} = 20\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,43	1,48	1,56
	$x = 7,5\text{m}$	1,46	1,44	1,41
	$x = 6,5\text{m}$	1,37	1,34	1,24
$t_{OG} = 15\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,00	1,06	1,13
	$x = 7,5\text{m}$	1,44	1,43	1,40
	$x = 6,5\text{m}$	1,37	1,33	1,24

Tabelle 172: Beulgefährdung für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1/TF2

	Laststellung	Verzweigungslastfaktor η_{Ki}		
		$t_{UG} = 25\text{mm}$	$t_{UG} = 20\text{mm}$	$t_{UG} = 15\text{mm}$
$t_{OG} = 15\text{mm}$	$x = 0\text{m}$	1,40	1,36	1,28
	$x = 7,5\text{m}$	1,44	1,43	1,40
	$x = 6,5\text{m}$	1,37	1,33	1,24

Tabelle 173: Beulgefährdung für $s=8\text{mm}$ in S355, mit Quer- und Längssteife TF1/TF2/TF3

C3 Zugehörige Ergebnisse zu Kapitel 6.4.2

Da die Dicke des Obergurts keinen Einfluss auf das Ergebnis ausübt, wird diese für die Untersuchung konstant mit 30mm ausgeführt.

	lokale Verformung u_z [mm] am Untergurt				
	s=22mm	s=15mm	s=12mm	s=10mm	s=8mm
$t_{UG}=30\text{mm}$	2,9	3,2	3,4	3,5	3,6
$t_{UG}=25\text{mm}$	3,3	4,0	4,3	4,6	5,0
$t_{UG}=20\text{mm}$	4,0	5,3	6,2	7,1	8,2
$t_{UG}=15\text{mm}$	5,3	7,3	9,3	11,6	16,1

Tabelle 174: Lokale Verformung am Untergurt im Bereich $x=0\text{m}$ bis $x=5\text{m}$

	lokale Verformung u_z [mm] am Untergurt				
	s=22mm	s=15mm	s=12mm	s=10mm	s=8mm
$t_{UG}=30\text{mm}$	2,5	3,3	3,6	3,9	4,7
$t_{UG}=25\text{mm}$	3,2	4,3	5,1	5,8	7,2
$t_{UG}=20\text{mm}$	4,1	6,1	7,9	9,2	12,3
$t_{UG}=15\text{mm}$	6,0	9,3	12,5	17,8	-

Tabelle 175: Lokale Verformung am Untergurt im Bereich $x=5\text{m}$ bis $x=10\text{m}$

		Verformung u_z [mm]	
		s=10mm	s=8mm
Abstand der Aussteifung [m]	2,0	6,0	6,8
	1,8	5,9	6,5
	1,6	5,8	6,5
	1,4	5,6	6,3
	1,2	5,4	6,1
	1,0	4,8	5,7
	0,8	-	-
	0,6	-	-
	0,4	-	-

Tabelle 176: Lokale Verformung am Untergurt mit Aussteifung für $t_{UG}=20\text{mm}$ im Bereich $x=0\text{m}$ bis $x=5\text{m}$, Rippentyp 1 (Bl.20x200x400)

		Verformung u_z [mm]			
		s=15mm	s=12mm	s=10mm	s=8mm
Abstand der Aussteifung [m]	2,0	7,4	8,9	10,3	12,4
	1,8	7,2	8,6	9,8	11,7
	1,6	6,9	8,0	9,1	10,8
	1,4	6,7	7,7	8,7	10,4
	1,2	6,4	7,3	8,2	9,8
	1,0	5,8	6,6	7,4	9,1
	0,8	4,9	5,6	6,4	8,2
	0,6	4,1	4,7	5,5	7,6
	0,4	3,5	4,2	5,1	7,6

Tabelle 177: Lokale Verformung am Untergurt mit Aussteifung für $t_{UG}=15\text{mm}$ im Bereich $x=0\text{m}$ bis $x=5\text{m}$, Rippentyp 1 (Bl.20x200x400)

		Verformung u_z [mm]		
		s=12mm	s=10mm	s=8mm
Abstand der Aussteifung [m]	2,0	8,1	9,0	10,1
	1,8	7,6	8,3	9,2
	1,6	7,0	7,6	8,4
	1,4	6,4	6,8	7,4
	1,2	5,6	5,9	6,4
	1,0	4,8	5,1	5,6
	0,8	-	-	-
	0,6	-	-	-
	0,4	-	-	-

Tabelle 178: Lokale Verformung am Untergurt mit Aussteifung für $t_{UG}=15\text{mm}$ im Bereich $x=0\text{m}$ bis $x=5\text{m}$, Rippentyp 2 (Bl.20x200x600)

		Verformung u_z [mm]
		s=8mm
Abstand der Aussteifung [m]	2,0	4,5
	1,8	4,4
	1,6	4,5
	1,4	4,8
	1,2	4,8
	1,0	4,9
	0,8	4,8
	0,6	4,9
	0,4	4,9

Tabelle 179: Lokale Verformung am Untergurt mit Aussteifung für $t_{UG}=25\text{mm}$ im Bereich $x=5\text{m}$ bis $x=10\text{m}$, Rippentyp 1 (Bl.20x200x400)

		Verformung u_z [mm]		
		s=12mm	s=10mm	s=8mm
Abstand der Aussteifung [m]	2,0	6,3	7,1	8,8
	1,8	6,0	6,8	8,3
	1,6	5,8	6,5	8,1
	1,4	5,7	6,5	8,8
	1,2	5,5	6,5	8,9
	1,0	5,2	6,4	8,9
	0,8	5,0	6,3	9,1
	0,6	4,6	6,0	9,2
	0,4	4,5	6,1	9,5

Tabelle 180: Lokale Verformung am Untergurt mit Aussteifung für $t_{UG}=20\text{mm}$ im Bereich $x=5\text{m}$ bis $x=10\text{m}$, Rippentyp 1 (Bl.20x0200x400)

		Verformung u_z [mm]			
		s=15mm	s=12mm	s=10mm	s=8mm
Abstand der Aussteifung [m]	2,0	8,1	10,5	13,3	-
	1,8	7,8	9,9	12,3	-
	1,6	7,5	9,3	11,4	-
	1,4	7,1	8,8	10,9	-
	1,2	6,7	8,3	10,4	-
	1,0	6,1	7,6	9,7	-
	0,8	5,4	7,0	9,3	-
	0,6	4,6	6,2	8,5	-
	0,4	4,0	5,7	8,6	-

Tabelle 181: Lokale Verformung am Untergurt mit Aussteifung für $t_{UG}=15\text{mm}$ im Bereich $x=5\text{m}$ bis $x=10\text{m}$, Rippentyp 1 (Bl.20x200x400)

		Verformung u_z [mm]		
		s=12mm	s=10mm	s=8mm
Abstand der Aussteifung [m]	2,0	5,7	6,3	7,3
	1,8	5,4	5,9	6,9
	1,6	5,0	5,6	6,5
	1,4	4,7	5,4	6,4
	1,2	4,4	4,9	6,1
	1,0	3,9	4,4	5,6
	0,8	3,6	4,1	5,4
	0,6	3,2	3,8	5,3
	0,4	3,0	3,7	5,1

Tabelle 182: Lokale Verformung am Untergurt mit Aussteifungen für $t_{UG}=20\text{mm}$ im Bereich $x=5\text{m}$ bis $x=10\text{m}$, Rippentyp 2 (Bl.20x200x600)

		Verformung u_z [mm]			
		s=15mm	s=12mm	s=10mm	s=8mm
Abstand der Aussteifung [m]	2,0	7,7	9,6	11,7	15,9
	1,8	7,3	8,9	10,5	13,6
	1,6	6,8	8,1	9,3	11,7
	1,4	6,3	7,3	8,4	10,4
	1,2	5,7	6,6	7,5	9,2
	1,0	5,0	5,7	6,6	8,2
	0,8	4,2	4,8	5,6	7,1
	0,6	3,4	4,0	4,9	6,8
	0,4	2,7	3,4	4,4	6,2

Tabelle 183: Lokale Verformung am Untergurt mit Aussteifungen für $t_{UG}=15\text{mm}$ im Bereich $x=5\text{m}$ bis $x=10\text{m}$, Rippentyp 2 (Bl.20x200x600)

Anhang D

Kalkulation

Varianten (S235)				Basisangaben						Tafelgewichte [kg]											
Lft-Nr.	s [mm]	t _{OG} [mm]	t _{UG} [mm]	Aufdi-ckungs-länge OG	Stegverstärkung erforder-lich	Lastein-leitungs-länge Steg	zusätzliche Ausstei-fung Beu-len	Verformungs Rippe für (x=5m bis x=10m)	Verformungs Rippe für (x=0m bis x=5m)	Steg-blech	Aufdi-ckung Stegblech	Untergurt blech	Obergurt-blech ohne Aufdickung	Aufdi-ckungs-blech OG	Zugla-sche	zusätzlich Beulausst.	zusätzl. Ver-formungs rippen x=5 bis x=10	zusätzl. Ver-formungs rippen x=0 bis x=5	Allgemeinen Bauteile (ohne Laschen)	Verbände	Summe Material
1	22	35	30	keine	keine	800	keine	keine	keine	3974	0	3458	2270	0	874	0	0	0	1310	1445	10667
2			25	keine	keine	800	keine	keine	keine	3974	0	2882	2270	0	874	0	0	0	1310	1445	11765
3			20	keine	keine	900	keine	keine	keine	3974	0	2306	2270	0	921	0	0	0	1310	1445	11189
4			15	keine	keine	900	keine	keine	keine	3974	0	1729	2270	0	921	0	0	0	1310	1445	10687
5		30	30	keine	keine	800	keine	keine	keine	3974	0	3458	1945	0	874	0	0	0	1310	1445	10412
6			25	keine	keine	800	keine	keine	keine	3974	0	2882	1945	0	874	0	0	0	1310	1445	11522
7			20	keine	keine	900	keine	keine	keine	3974	0	2306	1945	0	921	0	0	0	1310	1445	10946
8			15	keine	keine	900	keine	keine	keine	3974	0	1729	1945	0	921	0	0	0	1310	1445	10444
9		25	30	500	keine	800	keine	keine	keine	3974	0	3458	1542	148	874	0	0	0	1310	1445	10169
10			25	500	keine	800	keine	keine	keine	3974	0	2882	1542	148	874	0	0	0	1310	1445	11877
11			20	500	keine	900	keine	keine	keine	3974	0	2306	1542	148	921	0	0	0	1310	1445	11301
12			15	500	keine	900	keine	keine	keine	3974	0	1729	1542	148	921	0	0	0	1310	1445	10811
13		20	30	750	keine	800	keine	keine	keine	3974	0	3458	1202	208	874	0	0	0	1310	1445	10669
14			25	750	keine	800	keine	keine	keine	3974	0	2882	1202	208	874	0	0	0	1310	1445	11581
15			20	750	keine	900	keine	keine	keine	3974	0	2306	1202	208	921	0	0	0	1310	1445	11005
16			15	750	keine	900	keine	keine	keine	3974	0	1729	1202	208	921	0	0	0	1310	1445	10515
17	15	35	30	keine	22mm	1000	keine	keine	keine	2710	169,3	3458	2270	0	982	0	0	0	1310	1445	10373
18			25	keine	22mm	1000	keine	keine	keine	2710	169,3	2882	2270	0	982	0	0	0	1310	1445	10667
19			20	keine	22mm	1100	keine	keine	keine	2710	182,7	2306	2270	0	1043	0	0	0	1310	1445	11765
20			15	keine	22mm	1100	keine	Typ 1 á 1,0	Typ 1 á 1,0	2710	182,7	1729	2270	0	1043	0	129,6	172,8	1310	1445	11189
21		30	30	keine	22mm	1000	keine	keine	keine	2710	169,9	3458	1945	0	982	0	0	0	1310	1445	10687
22			25	keine	22mm	1000	keine	keine	keine	2710	169,9	2882	1945	0	982	0	0	0	1310	1445	10412
23			20	keine	22mm	1100	keine	keine	keine	2710	182,7	2306	1945	0	1043	0	0	0	1310	1445	11522
24			15	keine	22mm	1100	keine	Typ 1 á 1,0	Typ 1 á 1,0	2710	182,7	1729	1945	0	1043	0	129,6	172,8	1310	1445	10946
25		25	30	500	22mm	1000	keine	keine	keine	2710	169,9	3458	1542	148	982	0	0	0	1310	1445	10444
26			25	500	22mm	1000	keine	keine	keine	2710	169,9	2882	1542	148	982	0	0	0	1310	1445	10169
27			20	500	22mm	1100	keine	keine	keine	2710	182,7	2306	1542	148	1043	0	0	0	1310	1445	11877
28			15	500	22mm	1100	keine	Typ 1 á 1,0	Typ 1 á 1,0	2710	182,7	1729	1542	148	1043	0	129,6	172,8	1310	1445	11301
29		20	30	1000	22mm	1000	keine	keine	keine	2710	169,9	3458	1171	276	982	0	0	0	1310	1445	10811
30			25	1000	22mm	1000	keine	keine	keine	2710	169,9	2882	1171	276	982	0	0	0	1310	1445	10669
31			20	1000	22mm	1100	keine	keine	keine	2710	182,7	2306	1171	276	1043	0	0	0	1310	1445	11581
32			15	1000	22mm	1100	keine	Typ 1 á 1,0	Typ 1 á 1,0	2710	182,7	1729	1171	276	1043	0	129,6	172,8	1310	1445	11005
33	12	35	30	keine	22mm	1100	keine	keine	keine	2168	182,7	3458	2270	0	1043	0	0	0	1310	1445	10515
34			25	keine	22mm	1100	keine	keine	keine	2168	182,7	2882	2270	0	1043	0	0	0	1310	1445	10373
35			20	keine	22mm	1100	keine	Typ 1 á 1,4	keine	2168	182,7	2306	2270	0	1043	0	86,4	0	1310	1445	10667
36			15	keine	22mm	1200	keine	Typ 2 á 1,0	Typ 2 á 1,2	2168	196,1	1729	2270	0	1106	0	190,8	254,4	1310	1445	11765
37		30	30	250	22mm	1100	keine	keine	keine	2168	182,7	3458	1898	76	1043	0	0	0	1310	1445	11189
38			25	250	22mm	1100	keine	keine	keine	2168	182,7	2882	1898	76	1043	0	0	0	1310	1445	10687
39			20	250	22mm	1100	keine	Typ 1 á 1,4	keine	2168	182,7	2306	1898	76	1043	0	86,4	0	1310	1445	10412
40			15	250	22mm	1200	keine	Typ 2 á 1,0	Typ 2 á 1,2	2168	196,1	1729	1898	76	1106	0	190,8	254,4	1310	1445	11522

Tabelle 184: Aufstellung der Vorbauschabelvarianten mit Basisangaben und Tafelgewicht

Varianten (S235)				Basisangaben						Tafelgewichte [kg]												
Lft-Nr.	s [mm]	t _{OG} [mm]	t _{UG} [mm]	Aufdi-ckungs-länge OG	Stegverstärkung erforder-lich	Lastein-leitungs-länge Steg	zusätzliche Ausstei-fung Beu-len	Verformungs Rippe für (x=5m bis x=10m)	Verformungs Rippe für (x=0m bis x=5m)	Steg-blech	Aufdi-ckung Stegblech	Untergurt-blech	Obergurt-blech ohne Aufdickung	Aufdi-ckungs-blech OG	Zugla-sche	zusätzlich Beulausst.	zusätzl. Ver-formungs rippen x=5 bis x=10	zusätzl. Ver-formungs rippen x=0 bis x=5	Allgemeinen Bauteile (ohne Laschen)	Verbände	Summe Material	
41	12	25	30	500	22mm	1100	keine	keine	keine	2168	182,7	3458	1542	148	1043	0	0	0	1310	1445	11297	
42			25	500	22mm	1100	keine	keine	keine	2168	182,7	2882	1542	148	1043	0	0	0	1310	1445	10721	
43			20	500	22mm	1100	keine	Typ 1 á 1,4	keine	2168	182,7	2306	1542	148	1043	0	86,4	0	1310	1445	10231	
44			15	500	22mm	1200	keine	Typ 2 á 1,0	Typ 2 á 1,2	2168	196,1	1729	1542	148	1106	0	190,8	254,4	1310	1445	10089	
45		20	30	1700	22mm	1100	keine	keine	keine	2168	182,7	3458	1077	464	1043	0	0	0	1310	1445	11148	
46			25	1700	22mm	1100	keine	keine	keine	2168	182,7	2882	1077	464	1043	0	0	0	1310	1445	10572	
47			20	1700	22mm	1100	keine	Typ 1 á 1,4	keine	2168	182,7	2306	1077	464	1043	0	86,4	0	1310	1445	10082	
48			15	1700	22mm	1200	keine	Typ 2 á 1,0	Typ 2 á 1,2	2168	196,1	1729	1077	464	1106	0	190,8	254,4	1310	1445	9940	
49	10	35	30	keine	22mm	1200	keine	keine	keine	1806	196,1	3458	2270	0	1106	0	0	0	1310	1445	11591	
50			25	keine	22mm	1300	keine	keine	keine	1806	209,5	2882	2270	0	1170	0	0	0	1310	1445	11093	
51			20	keine	22mm	1300	keine	Typ 2 á 1,8	Typ 1 á 2,0	1806	209,5	2306	2270	0	1170	0	127,2	86,4	1310	1445	10730	
52			15	keine	22mm	1400	Q	Typ 2 á 0,8	Typ 2 á 1,2	1806	222,9	1729	2270	0	1233	232	254,4	254,4	1310	1445	10757	
53		30	30	500	22mm	1200	keine	keine	keine	1806	196,1	3458	1851	148	1106	0	0	0	1310	1445	11320	
54			25	500	22mm	1300	keine	keine	keine	1806	209,5	2882	1851	148	1170	0	0	0	1310	1445	10822	
55			20	500	22mm	1300	keine	Typ 2 á 1,8	Typ 1 á 2,0	1806	209,5	2306	1851	148	1170	0	127,2	86,4	1310	1445	10459	
56			15	500	22mm	1400	Q	Typ 2 á 0,8	Typ 2 á 1,2	1806	222,9	1729	1851	148	1233	232	254,4	254,4	1310	1445	10486	
57		25	30	750	22mm	1200	keine	keine	keine	1806	196,1	3458	1502	208	1106	0	0	0	1310	1445	11031	
58			25	750	22mm	1300	keine	keine	keine	1806	209,5	2882	1502	208	1170	0	0	0	1310	1445	10533	
59			20	750	22mm	1300	keine	Typ 2 á 1,8	Typ 1 á 2,0	1806	209,5	2306	1502	208	1170	0	127,2	86,4	1310	1445	10170	
60			15	750	22mm	1400	Q	Typ 2 á 0,8	Typ 2 á 1,2	1806	222,9	1729	1502	208	1233	232	254,4	254,4	1310	1445	10197	
61		20	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62			25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63			20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64			15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	8	35	30	keine	22mm	1200	Q + 1L	keine	keine	1445	196,1	3458	2270	0	1106	309	0	0	1310	1445	11539	
66			25	keine	22mm	1300	Q + 1L	Typ 1 á 2,0	keine	1445	209,5	2882	2270	0	1070	309	86,4	0	1310	1445	11027	
67			20	keine	22mm	1400	Q + 1L	Typ 2 á 1,2	Typ 1 á 1,2	1445	222,9	2306	2270	0	1233	309	127,2	172,8	1310	1445	10841	
68			15	keine	22mm	1600	Q + 2L	Typ 2 á 0,4	Typ 2 á 1,0	1445	249,7	1729	2270	0	1359,6	400	572,4	254,4	1310	1445	11035	
69		30	30	500	22mm	1200	Q + 1L	keine	keine	1445	196,1	3458	1851	148	1106	309	0	0	1310	1445	11268	
70			25	500	22mm	1300	Q + 1L	Typ 1 á 2,0	keine	1445	209,5	2882	1851	148	1070	309	86,4	0	1310	1445	10756	
71			20	500	22mm	1400	Q + 1L	Typ 2 á 1,2	Typ 1 á 1,2	1445	222,9	2306	1851	148	1233	309	127,2	172,8	1310	1445	10570	
72			15	500	22mm	1600	Q + 2L	Typ 2 á 0,4	Typ 2 á 1,0	1445	249,7	1729	1851	148	1359,6	400	572,4	254,4	1310	1445	10764	
73		25	30	750	22mm	1200	Q + 1L	keine	keine	1445	196,1	3458	1502	208	1106	309	0	0	1310	1445	10979	
74			25	750	22mm	1300	Q + 1L	Typ 1 á 2,0	keine	1445	209,5	2882	1502	208	1070	309	86,4	0	1310	1445	10467	
75			20	750	22mm	1400	Q + 1L	Typ 2 á 1,2	Typ 1 á 1,2	1445	222,9	2306	1502	208	1233	309	127,2	172,8	1310	1445	10281	
76			15	750	22mm	1600	Q + 2L	Typ 2 á 0,4	Typ 2 á 1,0	1445	249,7	1729	1502	208	1359,6	400	572,4	254,4	1310	1445	10475	
77		20	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78			25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79			20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80			15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 185: Aufstellung der Vorbauschnabelvarianten mit Basisangaben und Tafelgewicht - Fortsetzung 1

Varianten (S355)				Basisangaben						Tafelgewichte [kg]											
Lft-Nr.	s [mm]	t _{OG} [mm]	t _{UG} [mm]	Aufdickungs-länge OG	Stegverstärkung erforderlich	Lasteinleitungs-länge Steg	zusätzliche Aussteifung Beulen	Verformungs Rippe für (x=5m bis x=10m)	Verformungs Rippe für (x=0m bis x=5m)	Stegblech	Aufdickung Stegblech	Untergurtblech	Obergurtblech ohne Aufdickung	Aufdickungsblech OG	Zuglasche	zusätzlich Beulausst.	zusätzl. Verformungs rippen x=5 bis x=10	zusätzl. Verformungs rippen x=0 bis x=5	Allgemeinen Bauteile (ohne Laschen)	Verbände	Summe Material
81	15	30	25	keine	keine	600	keine	keine	keine	2710	0	2882	1945	0	712	0	0	0	1310	1445	11004
82			20	keine	keine	600	keine	keine	keine	2710	0	2306	1945	0	712	0	0	0	1310	1445	10428
83			15	keine	keine	600	keine	Typ 1 á 1,0	Typ 1 á 1,0	2710	0	1729	1945	0	712	0	172,8	172,8	1310	1445	10197
84		25	25	keine	keine	600	keine	keine	keine	2710	0	2882	1621	0	712	0	0	0	1310	1445	10680
85			20	keine	keine	600	keine	keine	keine	2710	0	2306	1621	0	712	0	0	0	1310	1445	10104
86			15	keine	keine	600	keine	Typ 1 á 1,0	Typ 1 á 1,0	2710	0	1729	1621	0	712	0	172,8	172,8	1310	1445	9873
87		20	25	keine	keine	600	keine	keine	keine	2710	0	2882	1297	0	712	0	0	0	1310	1445	10356
88			20	keine	keine	600	keine	keine	keine	2710	0	2306	1297	0	712	0	0	0	1310	1445	9780
89			15	keine	keine	600	keine	Typ 1 á 1,0	Typ 1 á 1,0	2710	0	1729	1297	0	712	0	172,8	172,8	1310	1445	9549
90		15	25	keine	keine	600	keine	keine	keine	2710	0	2882	973	0	712	0	0	0	1310	1445	10032
91			20	keine	keine	600	keine	keine	keine	2710	0	2306	973	0	712	0	0	0	1310	1445	9456
92			15	keine	keine	600	keine	Typ 1 á 1,0	Typ 1 á 1,0	2710	0	1729	973	0	712	0	172,8	172,8	1310	1445	9225
93	12	30	25	keine	15mm	700	keine	keine	keine	2168	88,6	2882	1945	0	793	0	0	0	1310	1445	10632
94			20	keine	15mm	700	keine	Typ 1 á 1,4	keine	2168	88,6	2306	1945	0	793	0	129,6	0	1310	1445	10185
95			15	keine	15mm	700	keine	Typ 2 á 1,0	Typ 2 á 1,2	2168	88,6	1729	1945	0	793	0	254,4	254,4	1310	1445	9987
96		25	25	keine	15mm	700	keine	keine	keine	2168	88,6	2882	1621	0	793	0	0	0	1310	1445	10308
97			20	keine	15mm	700	keine	Typ 1 á 1,4	keine	2168	88,6	2306	1621	0	793	0	129,6	0	1310	1445	9861
98			15	keine	15mm	700	keine	Typ 2 á 1,0	Typ 2 á 1,2	2168	88,6	1729	1621	0	793	0	254,4	254,4	1310	1445	9663
99		20	25	keine	15mm	700	keine	keine	keine	2168	88,6	2882	1297	0	793	0	0	0	1310	1445	9984
100			20	keine	15mm	700	keine	Typ 1 á 1,4	keine	2168	88,6	2306	1297	0	793	0	129,6	0	1310	1445	9537
101			15	keine	15mm	700	keine	Typ 2 á 1,0	Typ 2 á 1,2	2168	88,6	1729	1297	0	793	0	254,4	254,4	1310	1445	9339
102		15	25	1250	15mm	700	keine	keine	keine	2168	88,6	2882	973	196	793	0	0	0	1310	1445	9856
103			20	1250	15mm	700	Q+1L	Typ 1 á 1,4	keine	2168	88,6	2306	973	196	793	309	129,6	0	1310	1445	9718
104			15	1250	15mm	700	Q+1L	Typ 2 á 1,0	Typ 2 á 1,2	2168	88,6	1729	973	196	793	309	254,4	254,4	1310	1445	9520
105	10	30	25	keine	15mm	800	keine	keine	keine	1806	97,6	2882	1945	0	874	0	0	0	1310	1445	10360
106			20	keine	15mm	800	keine	Typ 2 á 1,8	Typ 1 á 2,0	1806	97,6	2306	1945	0	874	0	127,2	86,4	1310	1445	9997
107			15	keine	15mm	800	Q	Typ 2 á 0,8	Typ 2 á 1,2	1806	97,6	1729	1945	0	874	232	254,4	254,4	1310	1445	9947
108		25	25	keine	15mm	800	keine	keine	keine	1806	97,6	2882	1621	0	874	0	0	0	1310	1445	10036
109			20	keine	15mm	800	keine	Typ 2 á 1,8	Typ 1 á 2,0	1806	97,6	2306	1621	0	874	0	127,2	86,4	1310	1445	9673
110			15	keine	15mm	800	Q	Typ 2 á 0,8	Typ 2 á 1,2	1806	97,6	1729	1621	0	874	232	254,4	254,4	1310	1445	9623
111		20	25	keine	15mm	800	Q+1L	keine	keine	1806	97,6	2882	1297	0	874	309	0	0	1310	1445	10021
112			20	keine	15mm	800	Q+1L	Typ 2 á 1,8	Typ 1 á 2,0	1806	97,6	2306	1297	0	874	309	127,2	86,4	1310	1445	9658
113			15	keine	15mm	800	Q+1L	Typ 2 á 0,8	Typ 2 á 1,2	1806	97,6	1729	1297	0	874	309	254,4	254,4	1310	1445	9376
114		15	25	1250	15mm	800	Q+2L	keine	keine	1806	97,6	2882	973	196	874	400	0	0	1310	1445	9984
115			20	1250	15mm	800	Q+2L	Typ 2 á 1,8	Typ 1 á 2,0	1806	97,6	2306	973	196	874	400	127,2	86,4	1310	1445	9621
116			15	1250	15mm	800	Q+2L	Typ 2 á 0,8	Typ 2 á 1,2	1806	97,6	1729	973	196	874	400	254,4	254,4	1310	1445	9339

Tabelle 186: Aufstellung der Vorbauschabelvarianten mit Basisangaben und Tafelgewicht - Fortsetzung 2

Varianten (S355)				Basisangaben						Tafelgewichte [kg]											
Lft-Nr.	s [mm]	t _{OG} [mm]	t _{UG} [mm]	Aufdickungs-länge OG	Stegverstärkung erforderlich	Lasten-leitungs-länge Steg	zusätzliche Aussteifung Beulen	Verformungs Rippe für (x=5m bis x=10m)	Verformungs Rippe für (x=0m bis x=5m)	Stegblech	Aufdickung Stegblech	Untergurtblech	Obergurtblech ohne Aufdickung	Aufdickungsblech OG	Zuglasche	zusätzlich Beulausst.	zusätzl. Verformungs rippen x=5 bis x=10	zusätzl. Verformungs rippen x=0 bis x=5	Allgemeinen Bauteile (ohne Laschen)	Verbände	Summe Material
117	8	30	25	keine	15mm	900	Q+1L	Typ 1 á 2,0	keine	2882	1945	0	921	309	86,4	0	1310	1445	2882	1945	10450
118			20	keine	15mm	900	Q+1L	Typ 2 á 1,2	Typ 1 á 1,2	2306	1945	0	921	309	127,2	172,8	1310	1445	2306	1945	10088
119			15	keine	15mm	900	Q+2L	Typ 2 á 0,4	Typ 2 á 1,0	1729	1945	0	921	400	636	254,4	1310	1445	1729	1945	10192
120		25	25	keine	15mm	900	Q+1L	Typ 1 á 2,0	keine	2882	1621	0	921	309	86,4	0	1310	1445	2882	1621	10126
121			20	keine	15mm	900	Q+1L	Typ 2 á 1,2	Typ 1 á 1,2	2306	1621	0	921	309	127,2	172,8	1310	1445	2306	1621	9764
122			15	keine	15mm	900	Q+2L	Typ 2 á 0,4	Typ 2 á 1,0	1729	1621	0	921	400	636	254,4	1310	1445	1729	1621	9868
123		20	25	keine	15mm	900	Q+1L	Typ 1 á 2,0	keine	2882	1297	0	921	309	86,4	0	1310	1445	2882	1297	9802
124			20	keine	15mm	900	Q+2L	Typ 2 á 1,2	Typ 1 á 1,2	2306	1297	0	921	400	127,2	172,8	1310	1445	2306	1297	9531
125			15	keine	15mm	900	Q+2L	Typ 2 á 0,4	Typ 2 á 1,0	1729	1297	0	921	400	636	254,4	1310	1445	1729	1297	9544
126		15	25	1250	15mm	900	Q+3L	Typ 1 á 2,0	keine	2882	973	196	921	600	86,4	0	1310	1445	2882	973	9965
127			20	1250	15mm	900	Q+2L	Typ 2 á 1,2	Typ 1 á 1,2	2306	973	196	921	400	127,2	172,8	1310	1445	2306	973	9403
128			15	1250	15mm	900	Q+2L	Typ 2 á 0,4	Typ 2 á 1,0	1729	973	196	921	400	636	254,4	1310	1445	1729	973	9416

Tabelle 187: Aufstellung der Vorbauschabelvarianten mit Basisangaben und Tafelgewicht - Fortsetzung 3

Varianten (S235)				Basisangaben						Konstruktionseigengewicht [kg]											
Lft-Nr.	s [mm]	t _{OG} [mm]	t _{UG} [mm]	Aufdickungs-länge OG	Stegver-stärkung erforder-lich	Lastein-leitungs-länge Steg	zusätzliche Ausstei-fung Beu-len	Verformungs Rippe für (x=5m bis x=10m)	Verformungs Rippe für (x=0m bis x=5m)	Steg-blech	Aufdi-ckung Stegblech	Untergurt blech	Obergurt-blech ohne Aufdickung	Aufdi-ckungs blech OG	Zugla-sche	zusätzlich Beulausst.	zusätl. Ver-formungs rippen x=5 bis x=10	zusätl. Ver-formungs rippen x=0 bis x=5	Allgemeinen Bauteile (ohne Laschen)	Verbände	Summe Material
1	22	35	30	keine	keine	800	keine	keine	keine	3613	0	3303,4	2109,4	0	595	0	0	0	1114,6	824	11560
2			25	keine	keine	800	keine	keine	keine	3613	0	2752,8	2109,4	0	595	0	0	0	1114,6	824	11009
3			20	keine	keine	900	keine	keine	keine	3613	0	2202,2	2109,4	0	646,2	0	0	0	1114,6	824	10510
4			15	keine	keine	900	keine	keine	keine	3613	0	1651,6	2109,4	0	646,2	0	0	0	1114,6	824	9959
5		30	30	keine	keine	800	keine	keine	keine	3613	0	3303,4	1808,2	0	595	0	0	0	1114,6	824	11259
6			25	keine	keine	800	keine	keine	keine	3613	0	2752,8	1808,2	0	595	0	0	0	1114,6	824	10708
7			20	keine	keine	900	keine	keine	keine	3613	0	2202,2	1808,2	0	646,2	0	0	0	1114,6	824	10209
8			15	keine	keine	900	keine	keine	keine	3613	0	1651,6	1808,2	0	646,2	0	0	0	1114,6	824	9658
9		25	30	500	keine	800	keine	keine	keine	3613	0	3303,4	1428,2	123,8	595	0	0	0	1114,6	824	11002
10			25	500	keine	800	keine	keine	keine	3613	0	2752,8	1428,2	123,8	595	0	0	0	1114,6	824	10452
11			20	500	keine	900	keine	keine	keine	3613	0	2202,2	1428,2	123,8	646,2	0	0	0	1114,6	824	9952
12			15	500	keine	900	keine	keine	keine	3613	0	1651,6	1428,2	123,8	646,2	0	0	0	1114,6	824	9402
13		20	30	750	keine	800	keine	keine	keine	3613	0	3303,4	1111,2	185,8	595	0	0	0	1114,6	824	10747
14			25	750	keine	800	keine	keine	keine	3613	0	2752,8	1111,2	185,8	595	0	0	0	1114,6	824	10197
15			20	750	keine	900	keine	keine	keine	3613	0	2202,2	1111,2	185,8	646,2	0	0	0	1114,6	824	9697
16			15	750	keine	900	keine	keine	keine	3613	0	1651,6	1111,2	185,8	646,2	0	0	0	1114,6	824	9147
17	15	35	30	keine	22mm	1000	keine	keine	keine	2315	159,8	3303,4	2109,4	0	697,4	0	0	0	1114,6	824	10524
18			25	keine	22mm	1000	keine	keine	keine	2315	159,8	2752,8	2109,4	0	697,4	0	0	0	1114,6	824	9974
19			20	keine	22mm	1100	keine	keine	keine	2326	173,2	2202,2	2109,4	0	748,4	0	0	0	1114,6	824	9498
20			15	keine	22mm	1100	keine	Typ 1 á 1,0	Typ 1 á 1,0	2326	173,2	1651,6	2109,4	0	748,4	0	111,6	148,8	1114,6	824	9208
21		30	30	keine	22mm	1000	keine	keine	keine	2315	159,8	3303,4	1808,2	0	697,4	0	0	0	1114,6	824	10223
22			25	keine	22mm	1000	keine	keine	keine	2315	159,8	2752,8	1808,2	0	697,4	0	0	0	1114,6	824	9673
23			20	keine	22mm	1100	keine	keine	keine	2326	173,2	2202,2	1808,2	0	748,4	0	0	0	1114,6	824	9197
24			15	keine	22mm	1100	keine	Typ 1 á 1,0	Typ 1 á 1,0	2326	173,2	1651,6	1808,2	0	748,4	0	111,6	148,8	1114,6	824	8906
25		25	30	500	22mm	1000	keine	keine	keine	2315	159,8	3303,4	1428,2	123,8	697,4	0	0	0	1114,6	824	9967
26			25	500	22mm	1000	keine	keine	keine	2315	159,8	2752,8	1428,2	123,8	697,4	0	0	0	1114,6	824	9416
27			20	500	22mm	1100	keine	keine	keine	2326	173,2	2202,2	1428,2	123,8	748,4	0	0	0	1114,6	824	8940
28			15	500	22mm	1100	keine	Typ 1 á 1,0	Typ 1 á 1,0	2326	173,2	1651,6	1428,2	123,8	748,4	0	111,6	148,8	1114,6	824	8650
29		20	30	1000	22mm	1000	keine	keine	keine	2315	159,8	3303,4	1079,8	247,8	697,4	0	0	0	1114,6	824	9743
30			25	1000	22mm	1000	keine	keine	keine	2315	159,8	2752,8	1079,8	247,8	697,4	0	0	0	1114,6	824	9192
31			20	1000	22mm	1100	keine	keine	keine	2326	173,2	2202,2	1079,8	247,8	748,4	0	0	0	1114,6	824	8716
32			15	1000	22mm	1100	keine	Typ 1 á 1,0	Typ 1 á 1,0	2326	173,2	1651,6	1079,8	247,8	748,4	0	111,6	148,8	1114,6	824	8426
33	12	35	30	keine	22mm	1100	keine	keine	keine	1861	173,2	3303,4	2109,4	0	748,4	0	0	0	1114,6	824	10134
34			25	keine	22mm	1100	keine	keine	keine	1861	173,2	2752,8	2109,4	0	748,4	0	0	0	1114,6	824	9583
35			20	keine	22mm	1100	keine	Typ 1 á 1,4	keine	1861	173,2	2202,2	2109,4	0	748,4	0	74,4	0	1114,6	824	9107
36			15	keine	22mm	1200	keine	Typ 2 á 1,0	Typ 2 á 1,2	1852	186,6	1651,6	2109,4	0	799,6	0	166,8	222,4	1114,6	824	8928
37		30	30	250	22mm	1100	keine	keine	keine	1861	173,2	3303,4	1761	62	748,4	0	0	0	1114,6	824	9848
38			25	250	22mm	1100	keine	keine	keine	1861	173,2	2752,8	1761	62	748,4	0	0	0	1114,6	824	9297
39			20	250	22mm	1100	keine	Typ 1 á 1,4	keine	1861	173,2	2202,2	1761	62	748,4	0	74,4	0	1114,6	824	8821
40			15	250	22mm	1200	keine	Typ 2 á 1,0	Typ 2 á 1,2	1852	186,8	1651,6	1761	62	799,6	0	166,8	222,4	1114,6	824	8642

Tabelle 188: Aufstellung Konstruktionseigengewicht

Varianten (S235)				Basisangaben						Konstruktionseigengewicht [kg]											
Lft-Nr.	s [mm]	t _{OG} [mm]	t _{UG} [mm]	Aufdickungs-länge OG	Stegver-stärkung erforder-lich	Lastein-leitungs-länge Steg	zusätzliche Ausstei-fung Beu-len	Verformungs Rippe für (x=5m bis x=10m)	Verformungs Rippe für (x=0m bis x=5m)	Steg-blech	Aufdi-ckung Stegblech	Untergurt blech	Obergurt-blech ohne Aufdickung	Aufdi-ckungs blech OG	Zugla-sche	zusätzlich Beulausst.	zusätl. Ver-formungs rippen x=5 bis x=10	zusätl. Ver-formungs rippen x=0 bis x=5	Allgemeinen Bauteile (ohne Laschen)	Verbände	Summe Material
41	12	25	30	500	22mm	1100	keine	keine	keine	1861	173,2	3303,4	1428,2	123,8	748,4	0	0	0	1114,6	824	9577
42			25	500	22mm	1100	keine	keine	keine	1861	173,2	2752,8	1428,2	123,8	748,4	0	0	0	1114,6	824	9026
43			20	500	22mm	1100	keine	Typ 1 á 1,4	keine	1861	173,2	2202,2	1428,2	123,8	748,4	0	74,4	0	1114,6	824	8550
44			15	500	22mm	1200	keine	Typ 2 á 1,0	Typ 2 á 1,2	1852	186,6	1651,6	1428,2	123,8	799,6	0	166,8	222,4	1114,6	824	8370
45		20	30	1700	22mm	1100	keine	keine	keine	1861	173,2	3303,4	985,6	421,2	748,4	0	0	0	1114,6	824	9431
46			25	1700	22mm	1100	keine	keine	keine	1861	173,2	2752,8	985,6	421,2	748,4	0	0	0	1114,6	824	8881
47			20	1700	22mm	1100	keine	Typ 1 á 1,4	keine	1861	173,2	2202,2	985,6	421,2	748,4	0	74,4	0	1114,6	824	8405
48			15	1700	22mm	1200	keine	Typ 2 á 1,0	Typ 2 á 1,2	1852	186,6	1651,6	985,6	421,2	799,4	0	166,8	222,4	1114,6	824	8225
49	10	35	30	keine	22mm	1200	keine	keine	keine	1544	186,6	3303,4	2109,4	0	799,4	0	0	0	1114,6	824	9881
50			25	keine	22mm	1300	keine	keine	keine	1537	200	2752,8	2109,4	0	850,6	0	0	0	1114,6	824	9389
51			20	keine	22mm	1300	keine	Typ 2 á 1,8	Typ 1 á 2,0	1537	200	2202,2	2109,4	0	850,6	0	111,2	74,4	1114,6	824	9024
52			15	keine	22mm	1400	Q	Typ 2 á 0,8	Typ 2 á 1,2	1530	213,4	1651,6	2109,4	0	901,8	206,4	222,4	222,4	1114,6	824	8996
53		30	30	500	22mm	1200	keine	keine	keine	1544	186,6	3303,4	1713,8	123,8	799,4	0	0	0	1114,6	824	9610
54			25	500	22mm	1300	keine	keine	keine	1537	200	2752,8	1713,8	123,8	850,6	0	0	0	1114,6	824	9117
55			20	500	22mm	1300	keine	Typ 2 á 1,8	Typ 1 á 2,0	1537	200	2202,2	1713,8	123,8	850,6	0	111,2	74,4	1114,6	824	8752
56			15	500	22mm	1400	Q	Typ 2 á 0,8	Typ 2 á 1,2	1530	213,4	1651,6	1713,8	123,8	901,8	206,4	222,4	222,4	1114,6	824	8724
57		25	30	750	22mm	1200	keine	keine	keine	1544	186,6	3303,4	1388,8	185,8	799,4	0	0	0	1114,6	824	9347
58			25	750	22mm	1300	keine	keine	keine	1537	200	2752,8	1388,8	185,8	850,6	0	0	0	1114,6	824	8854
59			20	750	22mm	1300	keine	Typ 2 á 1,8	Typ 1 á 2,0	1537	200	2202,2	1388,8	185,8	850,6	0	111,2	74,4	1114,6	824	8489
60			15	750	22mm	1400	Q	Typ 2 á 0,8	Typ 2 á 1,2	1530	213,4	1651,6	1388,8	185,8	901,8	206,4	222,4	222,4	1114,6	824	8461
61		20	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62			25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63			20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64			15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	8	35	30	keine	22mm	1200	Q + 1L	keine	keine	1246	186,6	3303,4	2109,4	0	799,4	285,2	0	0	1114,6	824	9869
66			25	keine	22mm	1300	Q + 1L	Typ 1 á 2,0	keine	1251	200	2752,8	2109,4	0	850,6	285,2	74,4	0	1114,6	824	9462
67			20	keine	22mm	1400	Q + 1L	Typ 2 á 1,2	Typ 1 á 1,2	1256	213,4	2202,2	2109,4	0	901,8	285,2	111,2	148,8	1114,6	824	9167
68			15	keine	22mm	1600	Q + 2L	Typ 2 á 0,4	Typ 2 á 1,0	1267	240,2	1651,6	2109,4	0	1004	351,2	500,4	222,4	1114,6	824	9285
69		30	30	500	22mm	1200	Q + 1L	keine	keine	1246	186,6	3303,4	1713,8	123,8	799,4	285,2	0	0	1114,6	824	9597
70			25	500	22mm	1300	Q + 1L	Typ 1 á 2,0	keine	1251	200	2752,8	1713,8	123,8	850,6	285,2	74,4	0	1114,6	824	9191
71			20	500	22mm	1400	Q + 1L	Typ 2 á 1,2	Typ 1 á 1,2	1256	213,4	2202,2	1713,8	123,8	901,8	285,2	111,2	148,8	1114,6	824	8896
72			15	500	22mm	1600	Q + 2L	Typ 2 á 0,4	Typ 2 á 1,0	1267	240,2	1651,6	1713,8	123,8	1004	351,2	500,4	222,4	1114,6	824	9014
73		25	30	750	22mm	1200	Q + 1L	keine	keine	1246	186,6	3303,4	1388,8	185,8	799,4	285,2	0	0	1114,6	824	9334
74			25	750	22mm	1300	Q + 1L	Typ 1 á 2,0	keine	1251	200	2752,8	1388,8	185,8	850,6	285,2	74,4	0	1114,6	824	8928
75			20	750	22mm	1400	Q + 1L	Typ 2 á 1,2	Typ 1 á 1,2	1256	213,4	2202,2	1388,8	185,8	901,8	285,2	111,2	148,8	1114,6	824	8633
76			15	750	22mm	1600	Q + 2L	Typ 2 á 0,4	Typ 2 á 1,0	1267	240,2	1651,6	1388,8	185,8	1004	351,2	500,4	222,4	1114,6	824	8751
77		20	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78			25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79			20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80			15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 189: Aufstellung Konstruktionseigengewicht - Fortsetzung 1

Varianten (S355)				Basisangaben						Konstruktionseigengewicht [kg]											
Lft-Nr.	s [mm]	t _{OG} [mm]	t _{UG} [mm]	Aufdickungs-länge OG	Stegverstärkung erforderlich	Lasteinleitungs-länge Steg	zusätzliche Aussteifung Beulen	Verformungs Rippe für (x=5m bis x=10m)	Verformungs Rippe für (x=0m bis x=5m)	Stegblech	Aufdickung Stegblech	Untergurtblech	Obergurtblech ohne Aufdickung	Aufdickungsblech OG	Zuglasche	zusätzlich Beulausst.	zusätzl. Verformungs rippen x=5 bis x=10	zusätzl. Verformungs rippen x=0 bis x=5	Allgemeinen Bauteile (ohne Laschen)	Verbände	Summe Material
81	15	30	25	keine	keine	600	keine	keine	keine	2464	0	2752,8	1808,2	0	492,8	0	0	0	1114,6	824	9456
82			20	keine	keine	600	keine	keine	keine	2464	0	2202,2	1808,2	0	492,8	0	0	0	1114,6	824	8906
83			15	keine	keine	600	keine	Typ 1 á 1,0	Typ 1 á 1,0	2464	0	1651,6	1808,2	0	492,8	0	148,8	148,8	1114,6	824	8653
84		25	25	keine	keine	600	keine	keine	keine	2464	0	2752,8	1507	0	492,8	0	0	0	1114,6	824	9155
85			20	keine	keine	600	keine	keine	keine	2464	0	2202,2	1507	0	492,8	0	0	0	1114,6	824	8605
86			15	keine	keine	600	keine	Typ 1 á 1,0	Typ 1 á 1,0	2464	0	1651,6	1507	0	492,8	0	148,8	148,8	1114,6	824	8352
87		20	25	keine	keine	600	keine	keine	keine	2464	0	2752,8	1205,4	0	492,8	0	0	0	1114,6	824	8854
88			20	keine	keine	600	keine	keine	keine	2464	0	2202,2	1205,4	0	492,8	0	0	0	1114,6	824	8303
89			15	keine	keine	600	keine	Typ 1 á 1,0	Typ 1 á 1,0	2464	0	1651,6	1205,4	0	492,8	0	148,8	148,8	1114,6	824	8050
90		15	25	keine	keine	600	keine	keine	keine	2464	0	2752,8	904,2	0	492,8	0	0	0	1114,6	824	8552
91			20	keine	keine	600	keine	keine	keine	2464	0	2202,2	904,2	0	492,8	0	0	0	1114,6	824	8002
92			15	keine	keine	600	keine	Typ 1 á 1,0	Typ 1 á 1,0	2464	0	1651,6	904,2	0	492,8	0	148,8	148,8	1114,6	824	7749
93	12	30	25	keine	15mm	700	keine	keine	keine	1892	82	2752,8	1808,2	0	544	0	0	0	1114,6	824	9018
94			20	keine	15mm	700	keine	Typ 1 á 1,4	keine	1892	82	2202,2	1808,2	0	544	0	111,6	0	1114,6	824	8579
95			15	keine	15mm	700	keine	Typ 2 á 1,0	Typ 2 á 1,2	1892	82	1651,6	1808,2	0	544	0	222,4	222,4	1114,6	824	8362
96		25	25	keine	15mm	700	keine	keine	keine	1892	82	2752,8	1507	0	544	0	0	0	1114,6	824	8717
97			20	keine	15mm	700	keine	Typ 1 á 1,4	keine	1892	82	2202,2	1507	0	544	0	111,6	0	1114,6	824	8278
98			15	keine	15mm	700	keine	Typ 2 á 1,0	Typ 2 á 1,2	1892	82	1651,6	1507	0	544	0	222,4	222,4	1114,6	824	8061
99		20	25	keine	15mm	700	keine	keine	keine	1892	82	2752,8	1205,4	0	544	0	0	0	1114,6	824	8416
100			20	keine	15mm	700	keine	Typ 1 á 1,4	keine	1892	82	2202,2	1205,4	0	544	0	111,6	0	1114,6	824	7977
101			15	keine	15mm	700	keine	Typ 2 á 1,0	Typ 2 á 1,2	1892	82	1651,6	1205,4	0	544	0	222,4	222,4	1114,6	824	7759
102		15	25	1250	15mm	700	keine	keine	keine	1892	82	2752,8	786,2	177	544	0	0	0	1114,6	824	8173
103			20	1250	15mm	700	Q+1L	Typ 1 á 1,4	keine	1892	82	2202,2	786,2	177	544	285,2	111,6	0	1114,6	824	8020
104			15	1250	15mm	700	Q+1L	Typ 2 á 1,0	Typ 2 á 1,2	1892	82	1651,6	786,2	177	544	285,2	222,4	222,4	1114,6	824	7802
105	10	30	25	keine	15mm	800	keine	keine	keine	1571	91	2752,8	1808,2	0	595	0	0	0	1114,6	824	8757
106			20	keine	15mm	800	keine	Typ 2 á 1,8	Typ 1 á 2,0	1571	91	2202,2	1808,2	0	595	0	111,2	74,4	1114,6	824	8392
107			15	keine	15mm	800	Q	Typ 2 á 0,8	Typ 2 á 1,2	1571	91	1651,6	1808,2	0	595	206,4	222,4	222,4	1114,6	824	8307
108		25	25	keine	15mm	800	keine	keine	keine	1571	91	2752,8	1507	0	595	0	0	0	1114,6	824	8456
109			20	keine	15mm	800	keine	Typ 2 á 1,8	Typ 1 á 2,0	1571	91	2202,2	1507	0	595	0	111,2	74,4	1114,6	824	8091
110			15	keine	15mm	800	Q	Typ 2 á 0,8	Typ 2 á 1,2	1571	91	1651,6	1507	0	595	206,4	222,4	222,4	1114,6	824	8006
111		20	25	keine	15mm	800	Q+1L	keine	keine	1571	91	2752,8	1205,4	0	595	285,2	0	0	1114,6	824	8439
112			20	keine	15mm	800	Q+1L	Typ 2 á 1,8	Typ 1 á 2,0	1571	91	2202,2	1205,4	0	595	285,2	111,2	74,4	1114,6	824	8074
113			15	keine	15mm	800	Q+1L	Typ 2 á 0,8	Typ 2 á 1,2	1571	91	1651,6	1205,4	0	595	285,2	222,4	222,4	1114,6	824	7783
114		15	25	1250	15mm	800	Q+2L	keine	keine	1571	91	2752,8	786,2	177	595	351,2	0	0	1114,6	824	8263
115			20	1250	15mm	800	Q+2L	Typ 2 á 1,8	Typ 1 á 2,0	1571	91	2202,2	786,2	177	595	351,2	111,2	74,4	1114,6	824	7898
116			15	1250	15mm	800	Q+2L	Typ 2 á 0,8	Typ 2 á 1,2	1571	91	1651,6	786,2	177	595	351,2	222,4	222,4	1114,6	824	7607

Tabelle 190: Aufstellung Konstruktionseigengewicht - Fortsetzung 2

Varianten (S355)				Basisangaben						Konstruktionseigengewicht [kg]											
Lft-Nr.	s [mm]	t _{OG} [mm]	t _{UG} [mm]	Aufdickungs-länge OG	Stegverstärkung erforderlich	Lastenleitungs-länge Steg	zusätzliche Aussteifung Beulen	Verformungs Rippe für (x=5m bis x=10m)	Verformungs Rippe für (x=0m bis x=5m)	Stegblech	Aufdickung Stegblech	Untergurtblech	Obergurtblech ohne Aufdickung	Aufdickungsblech OG	Zuglasche	zusätzlich Beulausst.	zusätzl. Verformungs rippen x=5 bis x=10	zusätzl. Verformungs rippen x=0 bis x=5	Allgemeinen Bauteile (ohne Laschen)	Verbände	Summe Material
117	8	30	25	keine	15mm	900	Q+1L	Typ 1 á 2,0	keine	1229	100	2752,8	1808,2	0	646,2	285,2	74,4	0	1114,6	824	8835
118			20	keine	15mm	900	Q+1L	Typ 2 á 1,2	Typ 1 á 1,2	1229	100	2202,2	1808,2	0	646,2	285,2	111,2	148,8	1114,6	824	8470
119			15	keine	15mm	900	Q+2L	Typ 2 á 0,4	Typ 2 á 1,0	1229	100	1651,6	1808,3	0	646,2	351,2	556	222,4	1114,6	824	8504
120		25	25	keine	15mm	900	Q+1L	Typ 1 á 2,0	keine	1229	100	2752,8	1507	0	646,2	285,2	74,4	0	1114,6	824	8534
121			20	keine	15mm	900	Q+1L	Typ 2 á 1,2	Typ 1 á 1,2	1229	100	2202,2	1507	0	646,2	285,2	111,2	148,8	1114,6	824	8169
122			15	keine	15mm	900	Q+2L	Typ 2 á 0,4	Typ 2 á 1,0	1229	100	1651,6	1507	0	646,2	351,2	556	222,4	1114,6	824	8203
123		20	25	keine	15mm	900	Q+1L	Typ 1 á 2,0	keine	1229	100	2752,8	1205,4	0	646,2	285,2	74,4	0	1114,6	824	8232
124			20	keine	15mm	900	Q+2L	Typ 2 á 1,2	Typ 1 á 1,2	1229	100	2202,2	1205,4	0	646,2	351,2	111,2	148,8	1114,6	824	7933
125			15	keine	15mm	900	Q+2L	Typ 2 á 0,4	Typ 2 á 1,0	1229	100	1651,6	1205,4	0	646,2	351,2	556	222,4	1114,6	824	7901
126		15	25	1250	15mm	900	Q+3L	Typ 1 á 2,0	keine	1229	100	2752,8	786,2	177	646,2	531,7	74,4	0	1114,6	824	8237
127			20	1250	15mm	900	Q+2L	Typ 2 á 1,2	Typ 1 á 1,2	1229	100	2202,2	786,2	177	646,2	351,2	111,2	148,8	1114,6	824	7691
128			15	1250	15mm	900	Q+2L	Typ 2 á 0,4	Typ 2 á 1,0	1229	100	1651,6	786,2	177	646,2	351,2	556	222,4	1114,6	824	7659

Tabelle 191: Aufstellung Konstruktionseigengewicht - Fortsetzung 3

Varianten (S235)				Fertigungszeit [h] für Zusammenbau und Schweißarbeiten																	
Lft-Nr.	s [mm]	t _{OG} [mm]	t _{UG} [mm]	Schritt 1	Schritt 2	Schritt 3	Schritt 4	Schritt 5	Schritt 6	Schritt 7	Schritt 8	Schritt 9	Schritt 10	Schritt 11	Schritt 12	Schritt 13	Schritt 14	Schritt 15	Schritt 16	Schritt 17	Schritt 18
1	22	35	30	0,00	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	8,77	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2			25	0,00	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	8,77	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3			20	0,00	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	9,67	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4			15	0,00	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	9,67	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5		30	30	0,00	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	8,77	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6			25	0,00	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	8,77	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7			20	0,00	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	9,67	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8			15	0,00	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	9,67	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9		25	30	0,00	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	8,77	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10			25	0,00	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	8,77	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11			20	0,00	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	9,67	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12			15	0,00	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	9,67	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13		20	30	0,00	2,87	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	8,77	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14			25	0,00	2,87	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	8,77	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15			20	0,00	2,87	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	9,67	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16			15	0,00	2,87	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	9,67	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	15	35	30	0,95	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	8,07	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18			25	0,95	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	8,07	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19			20	0,95	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	8,72	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20			15	0,95	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	8,72	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	4,59	6,12
21		30	30	0,95	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	8,07	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22			25	0,95	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	8,07	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23			20	0,95	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	8,72	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24			15	0,95	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	8,72	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	4,59	6,12
25		25	30	0,95	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	8,07	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26			25	0,95	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	8,07	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27			20	0,95	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	8,72	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28			15	0,95	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	8,72	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	4,59	6,12
29		20	30	0,95	2,87	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	8,07	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30			25	0,95	2,87	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	8,07	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31			20	0,95	2,87	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	8,72	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
32			15	0,95	2,87	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	8,72	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	4,59	6,12
33	12	35	30	0,75	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	7,93	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
34			25	0,75	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	7,93	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
35			20	0,75	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	7,93	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	3,06	0,00
36			15	0,75	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	8,51	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	6,13	8,17
37		30	30	0,75	5,75	7,14	6,00	6,00	10,16	0,86	7,93	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
38			25	0,75	5,75	7,14	6,00	6,00	10,16	0,86	7,93	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
39			20	0,75	5,75	7,14	6,00	6,00	10,16	0,86	7,93	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	3,06	0,00
40			15	0,75	5,75	7,14	6,00	6,00	10,16	0,86	8,51	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	6,13	8,17

Tabelle 192: Aufstellung der Fertigungszeiten

Varianten (S235)				Fertigungszeit [h] für Zusammenbau und Schweißarbeiten																	
Lft-Nr.	s [mm]	t _{OG} [mm]	t _{UG} [mm]	Schritt 1	Schritt 2	Schritt 3	Schritt 4	Schritt 5	Schritt 6	Schritt 7	Schritt 8	Schritt 9	Schritt 10	Schritt 11	Schritt 12	Schritt 13	Schritt 14	Schritt 15	Schritt 16	Schritt 17	Schritt 18
41	12	25	30	0,75	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	7,93	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
42			25	0,75	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	7,93	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
43			20	0,75	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	7,93	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	3,06	0,00
44			15	0,75	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	8,51	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	6,13	8,17
45		20	30	0,75	2,87	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	7,93	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
46			25	0,75	2,87	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	7,93	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
47			20	0,75	2,87	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	7,93	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	3,06	0,00
48			15	0,75	2,87	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	8,51	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	6,13	8,17
49	10	35	30	0,62	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	8,14	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50			25	0,62	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	8,69	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
51			20	0,62	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	8,69	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	4,08	3,06
52			15	0,62	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	9,24	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	0,00	0,00	8,17	8,17
53		30	30	0,62	5,75	7,14	6,00	6,00	10,16	0,86	8,14	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
54			25	0,62	5,75	7,14	6,00	6,00	10,16	0,86	8,69	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
55			20	0,62	5,75	7,14	6,00	6,00	10,16	0,86	8,69	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	4,08	3,06
56			15	0,62	5,75	7,14	6,00	6,00	10,16	0,86	9,24	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	0,00	0,00	8,17	4,17
57		25	30	0,62	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	8,14	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
58			25	0,62	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	8,69	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
59			20	0,62	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	8,69	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	4,08	3,06
60			15	0,62	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	9,24	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	0,00	0,00	8,17	8,17
61		20	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62			25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63			20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64			15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	8	35	30	0,51	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	7,57	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	0,00	0,00
66			25	0,51	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	8,07	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	3,06	0,00
67			20	0,51	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	8,57	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	4,08	6,12
68			15	0,51	0,00	7,58	6,00	6,00	10,16	0,86	9,57	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	3,24	17,94	8,17
69		30	30	0,51	5,75	7,14	6,00	6,00	10,16	0,86	7,57	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	0,00	0,00
70			25	0,51	5,75	7,14	6,00	6,00	10,16	0,86	8,07	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	3,06	0,00
71			20	0,51	5,75	7,14	6,00	6,00	10,16	0,86	8,57	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	4,08	6,12
72			15	0,51	5,75	7,14	6,00	6,00	10,16	0,86	9,57	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	3,24	17,94	8,17
73		25	30	0,51	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	7,57	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	0,00	0,00
74			25	0,51	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	8,07	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	3,06	0,00
75			20	0,51	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	8,57	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	4,08	6,12
76			15	0,51	4,17	5,18	6,00	6,00	10,16	0,86	9,57	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	3,24	17,94	8,17
77		20	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78			25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79			20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80			15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 193: Aufstellung der Fertigungszeiten - Fortsetzung 1

Varianten (S355)				Fertigungszeit [h] für Zusammenbau und Schweißarbeiten																	
Lft-Nr.	s [mm]	t _{OG} [mm]	t _{UG} [mm]	Schritt 1	Schritt 2	Schritt 3	Schritt 4	Schritt 5	Schritt 6	Schritt 7	Schritt 8	Schritt 9	Schritt 10	Schritt 11	Schritt 12	Schritt 13	Schritt 14	Schritt 15	Schritt 16	Schritt 17	Schritt 18
81	15	30	25	0,00	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	3,47	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
82			20	0,00	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	3,47	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
83			15	0,00	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	3,47	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	6,12	6,12
84		25	25	0,00	0,00	4,18	6,00	6,00	10,16	0,86	3,47	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
85			20	0,00	0,00	4,18	6,00	6,00	10,16	0,86	3,47	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
86			15	0,00	0,00	4,18	6,00	6,00	10,16	0,86	3,47	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	6,12	6,12
87		20	25	0,00	0,00	2,87	6,00	6,00	10,16	0,86	3,47	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
88			20	0,00	0,00	2,87	6,00	6,00	10,16	0,86	3,47	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
89			15	0,00	0,00	2,87	6,00	6,00	10,16	0,86	3,47	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	6,12	6,12
90		15	25	0,00	0,00	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	3,47	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
91			20	0,00	0,00	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	3,47	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
92			15	0,00	0,00	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	3,47	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	6,12	6,12
93	12	30	25	0,75	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	3,37	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
94			20	0,75	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	3,37	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	4,59	0,00
95			15	0,75	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	3,37	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	8,17	8,17
96		25	25	0,75	0,00	4,18	6,00	6,00	10,16	0,86	3,37	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
97			20	0,75	0,00	4,18	6,00	6,00	10,16	0,86	3,37	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	4,59	0,00
98			15	0,75	0,00	4,18	6,00	6,00	10,16	0,86	3,37	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	8,17	8,17
99		20	25	0,75	0,00	2,87	6,00	6,00	10,16	0,86	3,37	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100			20	0,75	0,00	2,87	6,00	6,00	10,16	0,86	3,37	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	4,59	0,00
101			15	0,75	0,00	2,87	6,00	6,00	10,16	0,86	3,37	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	8,17	8,17
102		15	25	0,75	2,73	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	3,37	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
103			20	0,75	2,73	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	3,37	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	4,59	0,00
104			15	0,75	2,73	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	3,37	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	8,17	8,17
105	10	30	25	0,62	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	3,45	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
106			20	0,62	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	3,45	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	4,08	3,06
107			15	0,62	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	3,45	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	0,00	0,00	8,17	8,17
108		25	25	0,62	0,00	4,18	6,00	6,00	10,16	0,86	3,45	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
109			20	0,62	0,00	4,18	6,00	6,00	10,16	0,86	3,45	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	0,00	0,00	0,00	4,08	3,06
110			15	0,62	0,00	4,18	6,00	6,00	10,16	0,86	3,45	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	0,00	0,00	8,17	8,17
111		20	25	0,62	0,00	2,87	6,00	6,00	10,16	0,86	3,45	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	0,00	0,00
112			20	0,62	0,00	2,87	6,00	6,00	10,16	0,86	3,45	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	4,08	3,06
113			15	0,62	0,00	2,87	6,00	6,00	10,16	0,86	3,45	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	8,17	8,17
114		15	25	0,62	2,73	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	3,45	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	3,24	0,00	0,00
115			20	0,62	2,73	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	3,45	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	3,24	4,08	3,00
116			15	0,62	2,73	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	3,45	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	3,24	8,17	8,17

Tabelle 194: Aufstellung der Fertigungszeiten - Fortsetzung 2

Varianten (S355)				Fertigungszeit [h] für Zusammenbau und Schweißarbeiten																	
Lft-Nr.	s [mm]	t _{0G} [mm]	t _{UG} [mm]	Schritt 1	Schritt 2	Schritt 3	Schritt 4	Schritt 5	Schritt 6	Schritt 7	Schritt 8	Schritt 9	Schritt 10	Schritt 11	Schritt 12	Schritt 13	Schritt 14	Schritt 15	Schritt 16	Schritt 17	Schritt 18
117	8	30	25	0,51	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	3,32	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	3,06	0,00
118			20	0,51	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	3,32	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	4,08	6,12
119			15	0,51	0,00	5,75	6,00	6,00	10,16	0,86	3,32	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	3,24	20,43	8,17
120		25	25	0,51	0,00	4,18	6,00	6,00	10,16	0,86	3,32	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	3,06	0,00
121			20	0,51	0,00	4,18	6,00	6,00	10,16	0,86	3,32	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	4,08	6,12
122			15	0,51	0,00	4,18	6,00	6,00	10,16	0,86	3,32	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	3,24	20,43	8,17
123		20	25	0,51	0,00	2,87	6,00	6,00	10,16	0,86	3,32	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	0,00	3,06	0,00
124			20	0,51	0,00	2,87	6,00	6,00	10,16	0,86	3,32	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	3,24	4,08	6,12
125			15	0,51	0,00	2,87	6,00	6,00	10,16	0,86	3,32	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	3,24	20,43	8,17
126		15	25	0,51	2,73	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	3,32	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	8,75	3,06	0,00
127			20	0,51	2,73	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	3,32	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	3,24	4,08	6,12
128			15	0,51	2,73	3,54	6,00	6,00	10,16	0,86	3,32	5,04	2,84	4,19	2,58	1,15	5,19	3,75	3,24	20,43	8,17

Tabelle 195: Aufstellung der Fertigungszeiten - Fortsetzung 3

Varianten (S235)				Weiterführung der Fertigungszeiten [h]								Kostenkalkulation [€]								
Lft-Nr.	s [mm]	t _{OG} [mm]	t _{UG} [mm]	Brennen Bleche	Bohr- / Sägeauto- mat Ver- bände	Bohren der Löcher	Summe Fertigung ohne An- schlussble- che	Brennen der An- schlussble- che	Bohren Anschluss- bleche	Summe Fertigung Anschluss- bleche	Summe Fertigung mit An- schluss- blechen	Material- kosten Bleche ohne An- schluss	Material- kosten Anschlussb- leche	Material- kosten Profile	Summe Material ohne An- schlussble- che	Summe Material mit Anschluss- bleche	Summe Fertigung ohne An- schlussble- che	Summe Fertigung mit An- schlussble- che	Gesamt- kosten ohne An- schlussble- che	Gesamt- kosten mit Anschlussb- lechen
1	22	35	30	16,00	0,75	5,20	74,60	0,90	9,75	10,65	85,24	6975	439	1011,5	7987	8426	3282	3751	11269	12177
2			25	15,31	0,75	5,20	73,91	0,90	9,75	10,65	84,55	6637	439	1011,5	7649	8088	3252	3720	10901	11808
3			20	14,67	0,75	5,20	74,17	0,90	9,75	10,65	84,82	6327	439	1011,5	7338	7777	3264	3732	10602	11509
4			15	13,98	0,75	5,20	73,48	0,90	9,75	10,65	84,13	5988	439	1011,5	7000	7439	3233	3702	10233	11140
5		30	30	15,61	0,75	5,20	72,38	0,90	9,75	10,65	83,02	6785	439	1011,5	7796	8235	3185	3653	10981	11888
6			25	14,92	0,75	5,20	71,69	0,90	9,75	10,65	82,33	6447	439	1011,5	7458	7897	3154	3623	10612	11520
7			20	14,28	0,75	5,20	71,95	0,90	9,75	10,65	82,60	6136	439	1011,5	7148	7587	3166	3634	10314	11221
8			15	13,59	0,75	5,20	71,26	0,90	9,75	10,65	81,91	5798	439	1011,5	6809	7248	3135	3604	9944	10852
9		25	30	15,30	0,75	5,20	75,67	0,90	9,75	10,65	86,32	6635	439	1011,5	7647	8086	3330	3798	10976	11884
10			25	14,61	0,75	5,20	74,98	0,90	9,75	10,65	85,63	6297	439	1011,5	7309	7747	3299	3768	10608	11515
11			20	13,98	0,75	5,20	75,25	0,90	9,75	10,65	85,89	5987	439	1011,5	6998	7437	3311	3779	10309	11216
12			15	13,28	0,75	5,20	74,55	0,90	9,75	10,65	85,20	5648	439	1011,5	6659	7098	3280	3749	9940	10847
13		20	30	14,97	0,75	5,20	72,40	0,90	9,75	10,65	83,04	6471	439	1011,5	7482	7921	3185	3654	10668	11575
14			25	14,27	0,75	5,20	71,70	0,90	9,75	10,65	82,35	6133	439	1011,5	7144	7583	3155	3623	10299	11207
15			20	13,64	0,75	5,20	71,97	0,90	9,75	10,65	82,62	5822	439	1011,5	6834	7273	3167	3635	10000	10908
16			15	12,95	0,75	5,20	71,28	0,90	9,75	10,65	81,92	5484	439	1011,5	6495	6934	3136	3605	9631	10539
17	15	35	30	14,81	0,75	5,20	73,66	0,90	9,75	10,65	84,31	6396	439	1011,5	7408	7847	3241	3710	10649	11557
18			25	14,12	0,75	5,20	72,97	0,90	9,75	10,65	83,62	6058	439	1011,5	7070	7509	3211	3679	10281	11188
19			20	13,52	0,75	5,20	73,02	0,90	9,75	10,65	83,67	5764	439	1011,5	6775	7214	3213	3681	9988	10896
20			15	13,19	0,75	5,20	83,40	0,90	9,75	10,65	94,05	5603	439	1011,5	6614	7053	3670	4138	10284	11191
21		30	30	14,42	0,75	5,20	71,44	0,90	9,75	10,65	82,09	6206	439	1011,5	7217	7656	3144	3612	10361	11268
22			25	13,73	0,75	5,20	70,75	0,90	9,75	10,65	81,40	5868	439	1011,5	6879	7318	3113	3582	9993	10900
23			20	13,13	0,75	5,20	70,80	0,90	9,75	10,65	81,45	5573	439	1011,5	6585	7024	3115	3584	9700	10607
24			15	12,80	0,75	5,20	81,18	0,90	9,75	10,65	91,83	5412	439	1011,5	6424	6863	3572	4040	9996	10903
25		25	30	14,12	0,75	5,20	74,74	0,90	9,75	10,65	85,39	6056	439	1011,5	7068	7507	3288	3757	10356	11264
26			25	13,43	0,75	5,20	74,05	0,90	9,75	10,65	84,69	5718	439	1011,5	6730	7169	3258	3727	9988	10895
27			20	12,82	0,75	5,20	74,09	0,90	9,75	10,65	84,74	5424	439	1011,5	6435	6874	3260	3729	9695	10603
28			15	12,49	0,75	5,20	84,47	0,90	9,75	10,65	95,12	5262	439	1011,5	6274	6713	3717	4185	9991	10898
29		20	30	13,83	0,75	5,20	71,51	0,90	9,75	10,65	82,15	5914	439	1011,5	6925	7364	3146	3615	10072	10979
30			25	13,14	0,75	5,20	70,82	0,90	9,75	10,65	81,46	5576	439	1011,5	6587	7026	3116	3584	9703	10611
31			20	12,53	0,75	5,20	70,86	0,90	9,75	10,65	81,51	5281	439	1011,5	6292	6731	3118	3586	9410	10318
32			15	12,20	0,75	5,20	81,24	0,90	9,75	10,65	91,89	5120	439	1011,5	6131	6570	3575	4043	9706	10613
33	12	35	30	14,25	0,75	5,20	72,76	0,90	9,75	10,65	83,41	6122	439	1011,5	7133	7572	3202	3670	10335	11242
34			25	13,56	0,75	5,20	72,07	0,90	9,75	10,65	82,72	5784	439	1011,5	6795	7234	3171	3640	9967	10874
35			20	12,97	0,75	5,20	74,54	0,90	9,75	10,65	85,19	5497	439	1011,5	6508	6947	3280	3748	9788	10695
36			15	12,80	0,75	5,20	86,19	0,90	9,75	10,65	96,84	5413	439	1011,5	6425	6864	3792	4261	10217	11125
37		30	30	13,90	0,75	5,20	77,72	0,90	9,75	10,65	88,36	5948	439	1011,5	6960	7399	3420	3888	10379	11287
38			25	13,21	0,75	5,20	77,03	0,90	9,75	10,65	87,67	5610	439	1011,5	6622	7061	3389	3858	10011	10918
39			20	12,62	0,75	5,20	79,50	0,90	9,75	10,65	90,15	5323	439	1011,5	6334	6773	3498	3966	9832	10740
40			15	12,45	0,75	5,20	91,15	0,90	9,75	10,65	101,80	5240	439	1011,5	6251	6690	4011	4479	10262	11169

Tabelle 196: Aufstellung Kostenkalkulation

Varianten (S235)				Weiterführung der Fertigungszeiten [h]								Kostenkalkulation [€]									
Lft-Nr.	s [mm]	t _{OG} [mm]	t _{UG} [mm]	Brennen Bleche	Bohr- / Sägeauto- mat Ver- bände	Bohren der Löcher	Summe Fertigung ohne An- schlussble- che	Brennen der An- schlussble- che	Bohren Anschluss- bleche	Summe Fertigung Anschluss- bleche	Summe Fertigung mit An- schlussble- chen	Material- kosten Bleche ohne Anschluss	Material- kosten Anschlussb- leche	Material- kosten Profile	Summe Material ohne An- schlussble- che	Summe Material mit Anschluss- bleche	Summe Fertigung ohne An- schlussble- che	Summe Fertigung mit An- schlussble- che	Gesamt- kosten ohne An- schlussble- che	Gesamt- kosten mit Anschlussb- lechen	
41		25	30	13,56	0,75	5,20	73,84	0,90	9,75	10,65	84,48	5782	439	1011,5	6793	7232	3249	3717	10042	10949	
42			25	12,86	0,75	5,20	73,14	0,90	9,75	10,65	83,79	5444	439	1011,5	6455	6894	3218	3687	9673	10581	
43			20	12,28	0,75	5,20	75,62	0,90	9,75	10,65	86,26	5156	439	1011,5	6168	6607	3327	3796	9495	10402	
44			15	12,11	0,75	5,20	87,27	0,90	9,75	10,65	97,91	5073	439	1011,5	6084	6523	3840	4308	9924	10832	
45		20	30	13,38	0,75	5,20	70,72	0,90	9,75	10,65	81,36	5694	439	1011,5	6706	7145	3112	3580	9817	10725	
46			25	12,69	0,75	5,20	70,03	0,90	9,75	10,65	80,67	5356	439	1011,5	6368	6807	3081	3550	9449	10356	
47			20	12,10	0,75	5,20	72,50	0,90	9,75	10,65	83,15	5069	439	1011,5	6080	6519	3190	3658	9270	10178	
48			15	11,93	0,75	5,20	84,15	0,90	9,75	10,65	94,80	4986	439	1011,5	5997	6436	3703	4171	9700	10607	
49		35	30	13,91	0,75	5,20	72,50	0,90	9,75	10,65	83,15	5954	439	1011,5	6966	7405	3190	3658	10156	11063	
50			25	13,31	0,75	5,20	72,45	0,90	9,75	10,65	83,10	5662	439	1011,5	6673	7112	3188	3656	9861	10769	
51			20	12,88	0,75	5,20	79,16	0,90	9,75	10,65	89,80	5449	439	1011,5	6461	6900	3483	3951	9943	10851	
52			15	12,91	0,75	5,20	94,13	0,90	9,75	10,65	104,78	5465	439	1011,5	6476	6915	4142	4610	10618	11525	
53		30	30	13,58	0,75	5,20	77,48	0,90	9,75	10,65	88,13	5795	439	1011,5	6807	7246	3409	3878	10216	11124	
54			25	12,99	0,75	5,20	77,44	0,90	9,75	10,65	88,08	5503	439	1011,5	6514	6953	3407	3876	9921	10829	
55			20	12,55	0,75	5,20	84,14	0,90	9,75	10,65	94,79	5290	439	1011,5	6302	6740	3702	4171	10004	10911	
56			15	12,58	0,75	5,20	95,11	0,90	9,75	10,65	105,76	5306	439	1011,5	6317	6756	4185	4653	10502	11410	
57		25	30	13,24	0,75	5,20	73,60	0,90	9,75	10,65	84,24	5626	439	1011,5	6637	7076	3238	3707	9875	10783	
58			25	12,64	0,75	5,20	73,55	0,90	9,75	10,65	84,20	5333	439	1011,5	6345	6784	3236	3705	9581	10488	
59			20	12,20	0,75	5,20	80,25	0,90	9,75	10,65	90,90	5120	439	1011,5	6132	6571	3531	4000	9663	10571	
60			15	12,24	0,75	5,20	95,23	0,90	9,75	10,65	105,87	5136	439	1011,5	6148	6586	4190	4658	10337	11245	
61		20	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
62			25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
63			20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
64			15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
65		35	30	13,85	0,75	5,20	80,69	0,90	9,75	10,65	91,34	5924	439	1011,5	6935	7374	3550	4019	10486	11393	
66			25	13,23	0,75	5,20	83,64	0,90	9,75	10,65	94,29	5623	439	1011,5	6635	7074	3680	4149	10315	11222	
67			20	13,01	0,75	5,20	91,06	0,90	9,75	10,65	101,70	5514	439	1011,5	6526	6965	4006	4475	10532	11439	
68			15	13,24	0,75	5,20	111,44	0,90	9,75	10,65	122,08	5628	439	1011,5	6640	7079	4903	5372	11543	12450	
69		30	30	13,52	0,75	5,20	85,68	0,90	9,75	10,65	96,33	5765	439	1011,5	6776	7215	3770	4238	10546	11454	
70			25	12,91	0,75	5,20	88,62	0,90	9,75	10,65	99,27	5464	439	1011,5	6476	6915	3899	4368	10375	11283	
71			20	12,68	0,75	5,20	96,04	0,90	9,75	10,65	106,69	5355	439	1011,5	6367	6806	4226	4694	10592	11500	
72			15	12,92	0,75	5,20	116,42	0,90	9,75	10,65	127,07	5469	439	1011,5	6481	6919	5123	5591	11603	12511	
73		25	30	13,17	0,75	5,20	81,79	0,90	9,75	10,65	92,44	5595	439	1011,5	6607	7046	3599	4067	10205	11113	
74			25	12,56	0,75	5,20	84,74	0,90	9,75	10,65	95,38	5295	439	1011,5	6306	6745	3728	4197	10034	10942	
75			20	12,34	0,75	5,20	92,15	0,90	9,75	10,65	102,80	5185	439	1011,5	6197	6636	4055	4523	10252	11159	
76			15	12,57	0,75	5,20	112,54	0,90	9,75	10,65	123,18	5299	439	1011,5	6311	6750	4952	5420	11262	12170	
77		20	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
78			25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
79			20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
80			15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

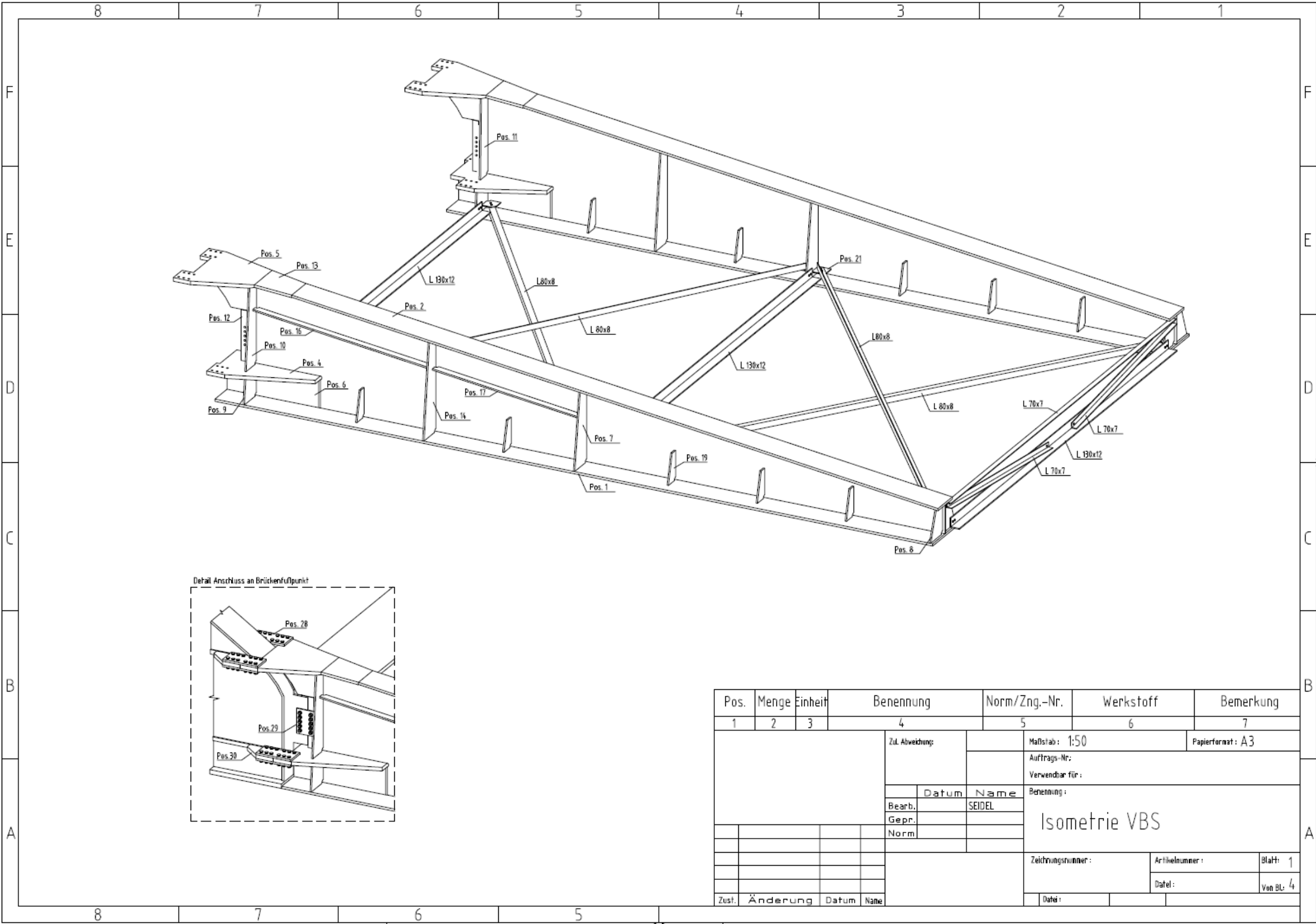
Tabelle 197: Aufstellung Kostenkalkulation - Fortsetzung 1

Varianten (S355)				Weiterführung der Fertigungszeiten [h]								Kostenkalkulation [€]								
Lft-Nr.	s [mm]	t _{OG} [mm]	t _{UG} [mm]	Brennen Bleche	Bohr- / Sägeauto-mat Ver-bände	Bohren der Löcher	Summe Fertigung ohne An-schlussble-che	Brennen der An-schlussble-che	Bohren Anschluss-bleche	Summe Fertigung Anschluss-bleche	Summe Fertigung mit An-schlussble-chen	Material-kosten Bleche ohne An-schluss	Material-kosten Anschluss-bleche	Material-kosten Profile	Summe Material ohne An-schlussble-che	Summe Material mit Anschluss-bleche	Summe Fertigung ohne An-schlussble-che	Summe Fertigung mit An-schlussble-che	Gesamt-kosten ohne An-schlussble-che	Gesamt-kosten mit Anschluss-blechen
81	15	30	25	13,20	0,75	5,20	64,67	0,90	9,75	10,65	75,32	5940	465	1011,5	6951	7416	2846	3314	9797	10730
82			20	12,51	0,75	5,20	63,98	0,90	9,75	10,65	74,63	5582	465	1011,5	6593	7058	2815	3284	9409	10342
83			15	12,24	0,75	5,20	75,95	0,90	9,75	10,65	86,59	5438	465	1011,5	6449	6914	3342	3810	9791	10724
84		25	25	12,82	0,75	5,20	62,72	0,90	9,75	10,65	73,36	5738	465	1011,5	6750	7215	2760	3228	9509	10443
85			20	12,12	0,75	5,20	62,02	0,90	9,75	10,65	72,67	5380	465	1011,5	6392	6857	2729	3198	9121	10054
86			15	11,85	0,75	5,20	73,99	0,90	9,75	10,65	84,63	5237	465	1011,5	6248	6713	3255	3724	9504	10437
87		20	25	12,43	0,75	5,20	61,02	0,90	9,75	10,65	71,66	5537	465	1011,5	6549	7013	2685	3153	9233	10167
88			20	11,74	0,75	5,20	60,33	0,90	9,75	10,65	70,97	5179	465	1011,5	6191	6655	2654	3123	8845	9778
89			15	11,46	0,75	5,20	72,29	0,90	9,75	10,65	82,94	5035	465	1011,5	6047	6512	3181	3649	9228	10161
90		15	25	12,04	0,75	5,20	61,30	0,90	9,75	10,65	71,95	5336	465	1011,5	6347	6812	2697	3166	9044	9978
91			20	11,35	0,75	5,20	60,61	0,90	9,75	10,65	71,25	4978	465	1011,5	5989	6454	2667	3135	8656	9589
92			15	11,07	0,75	5,20	72,57	0,90	9,75	10,65	83,22	4834	465	1011,5	5846	6310	3193	3662	9039	9972
93	12	30	25	12,76	0,75	5,20	64,88	0,90	9,75	10,65	75,53	5708	465	1011,5	6720	7185	2855	3323	9574	10508
94			20	12,22	0,75	5,20	68,93	0,90	9,75	10,65	79,58	5431	465	1011,5	6442	6907	3033	3502	9475	10409
95			15	11,98	0,75	5,20	80,44	0,90	9,75	10,65	91,09	5308	465	1011,5	6319	6784	3540	4008	9859	10792
96		25	25	12,37	0,75	5,20	62,92	0,90	9,75	10,65	73,57	5507	465	1011,5	6518	6983	2768	3237	9287	10220
97			20	11,83	0,75	5,20	66,97	0,90	9,75	10,65	77,62	5230	465	1011,5	6241	6706	2947	3415	9188	10121
98			15	11,60	0,75	5,20	78,49	0,90	9,75	10,65	89,13	5107	465	1011,5	6118	6583	3453	3922	9572	10505
99		20	25	11,98	0,75	5,20	61,22	0,90	9,75	10,65	71,87	5306	465	1011,5	6317	6782	2694	3162	9011	9944
100			20	11,44	0,75	5,20	65,27	0,90	9,75	10,65	75,92	5028	465	1011,5	6040	6505	2872	3341	8912	9845
101			15	11,21	0,75	5,20	76,79	0,90	9,75	10,65	87,43	4905	465	1011,5	5917	6382	3379	3847	9295	10229
102		15	25	11,83	0,75	5,20	64,47	0,90	9,75	10,65	75,11	5226	465	1011,5	6238	6702	2837	3305	9074	10007
103			20	11,66	0,75	5,20	77,83	0,90	9,75	10,65	88,48	5141	465	1011,5	6152	6617	3425	3893	9577	10510
104			15	11,42	0,75	5,20	89,34	0,90	9,75	10,65	99,99	5018	465	1011,5	6029	6494	3931	4400	9960	10894
105	10	30	25	12,43	0,75	5,20	64,50	0,90	9,75	10,65	75,15	5539	465	1011,5	6551	7016	2838	3307	9389	10322
106			20	12,00	0,75	5,20	71,21	0,90	9,75	10,65	81,85	5314	465	1011,5	6326	6790	3133	3602	9459	10392
107			15	11,94	0,75	5,20	85,54	0,90	9,75	10,65	96,18	5283	465	1011,5	6295	6759	3764	4232	10058	10992
108		25	25	12,04	0,75	5,20	62,54	0,90	9,75	10,65	73,19	5338	465	1011,5	6349	6814	2752	3220	9101	10035
109			20	11,61	0,75	5,20	69,25	0,90	9,75	10,65	79,90	5113	465	1011,5	6124	6589	3047	3515	9171	10104
110			15	11,55	0,75	5,20	83,58	0,90	9,75	10,65	94,23	5082	465	1011,5	6093	6558	3677	4146	9771	10704
111		20	25	12,02	0,75	5,20	70,15	0,90	9,75	10,65	80,80	5329	465	1011,5	6340	6805	3087	3555	9427	10360
112			20	11,59	0,75	5,20	76,86	0,90	9,75	10,65	87,51	5103	465	1011,5	6115	6580	3382	3850	9497	10430
113			15	11,25	0,75	5,20	85,72	0,90	9,75	10,65	96,37	4928	465	1011,5	5940	6405	3772	4240	9712	10645
114		15	25	11,98	0,75	5,20	76,75	0,90	9,75	10,65	87,40	5306	465	1011,5	6317	6782	3377	3846	9694	10627
115			20	11,55	0,75	5,20	83,40	0,90	9,75	10,65	94,04	5080	465	1011,5	6092	6557	3669	4138	9761	10695
116			15	11,21	0,75	5,20	92,32	0,90	9,75	10,65	102,96	4905	465	1011,5	5917	6382	4062	4530	9979	10912

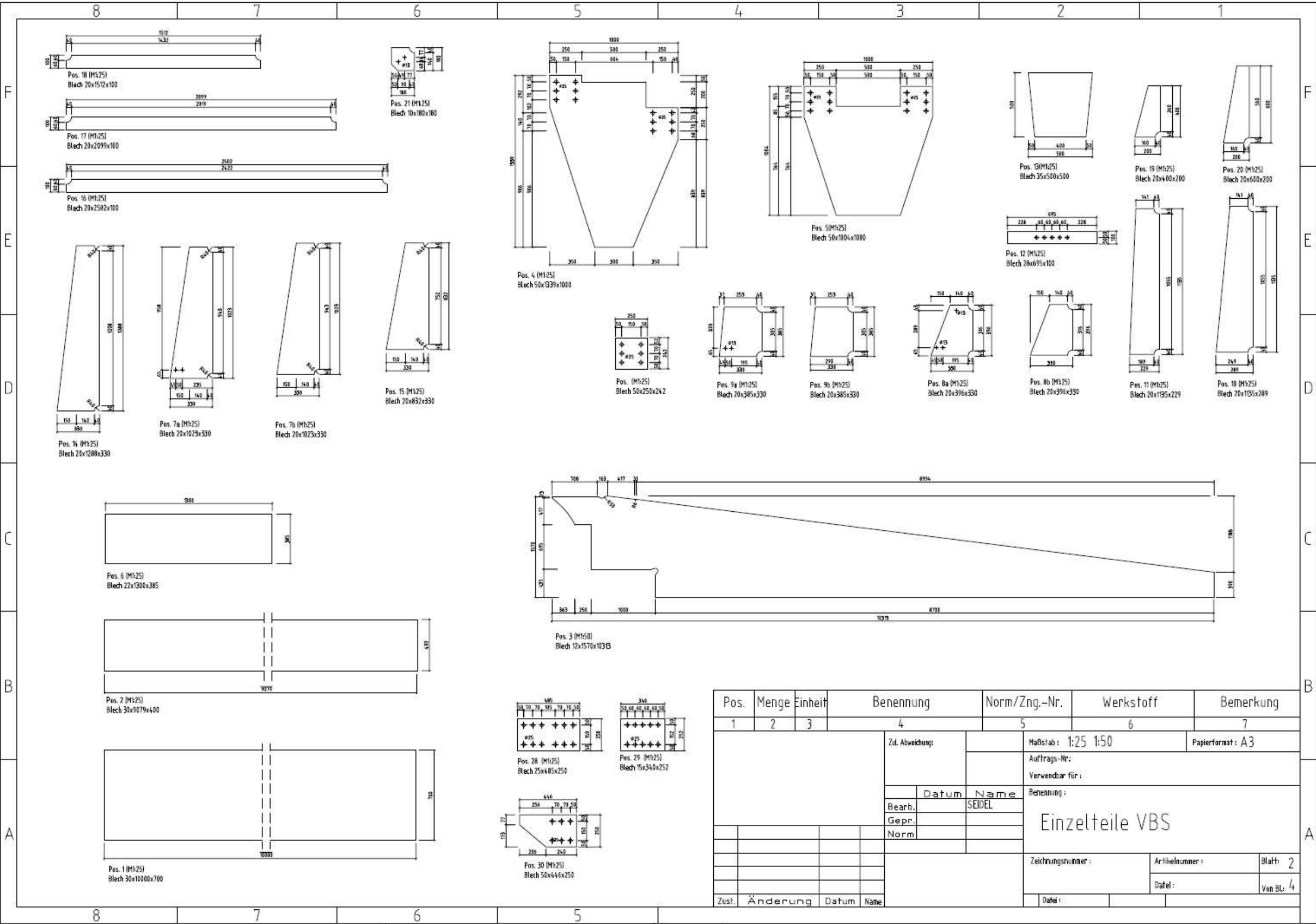
Tabelle 198: Aufstellung Kostenkalkulation - Fortsetzung 2

Varianten (S355)				Weiterführung der Fertigungszeiten [h]								Kostenkalkulation [€]									
Lft-Nr.	s [mm]	t _{OG} [mm]	t _{UG} [mm]	Brennen Bleche	Bohr- / Sägeauto-mat Ver-bände	Bohren der Löcher	Summe Fertigung ohne An-schlussble-che	Brennen der An-schlussble-che	Bohren Anschluss-bleche	Summe Fertigung Anschluss-bleche	Summe Fertigung mit An-schlussble-chen	Material-kosten Bleche ohne An-schluss	Material-kosten Anschluss-bleche	Material-kosten Profile	Summe Material ohne An-schlussble-che	Summe Material mit Anschluss-bleche	Summe Fertigung ohne An-schlussble-che	Summe Fertigung mit An-schlussble-che	Gesamt-kosten ohne An-schlussble-che	Gesamt-kosten mit Anschluss-blechen	
117	8	30	25	12,54	0,75	5,20	76,37	0,90	9,75	10,65	87,02	5595	465	1011,5	6607	7072	3360	3829	9967	10900	
118			20	12,11	0,75	5,20	83,08	0,90	9,75	10,65	93,72	5370	465	1011,5	6382	6847	3655	4124	10037	10970	
119			15	12,23	0,75	5,20	104,84	0,90	9,75	10,65	115,49	5435	465	1011,5	6447	6911	4613	5081	11060	11993	
120		25	25	12,15	0,75	5,20	74,41	0,90	9,75	10,65	85,06	5394	465	1011,5	6406	6870	3274	3743	9680	10613	
121			20	11,72	0,75	5,20	81,12	0,90	9,75	10,65	91,76	5169	465	1011,5	6180	6645	3569	4038	9750	10683	
122			15	11,84	0,75	5,20	102,88	0,90	9,75	10,65	113,53	5234	465	1011,5	6245	6710	4527	4995	10772	11705	
123		20	25	11,76	0,75	5,20	72,71	0,90	9,75	10,65	83,36	5193	465	1011,5	6204	6669	3199	3668	9404	10337	
124			20	11,44	0,75	5,20	82,77	0,90	9,75	10,65	93,41	5024	465	1011,5	6036	6500	3642	4110	9677	10611	
125			15	11,45	0,75	5,20	101,18	0,90	9,75	10,65	111,83	5032	465	1011,5	6044	6509	4452	4921	10496	11429	
126		15	25	11,96	0,75	5,20	85,06	0,90	9,75	10,65	95,71	5294	465	1011,5	6306	6770	3743	4211	10048	10981	
127			20	11,28	0,75	5,20	86,01	0,90	9,75	10,65	96,66	4945	465	1011,5	5956	6421	3785	4253	9741	10674	
128			15	11,30	0,75	5,20	104,43	0,90	9,75	10,65	115,08	4953	465	1011,5	5964	6429	4595	5063	10559	11493	

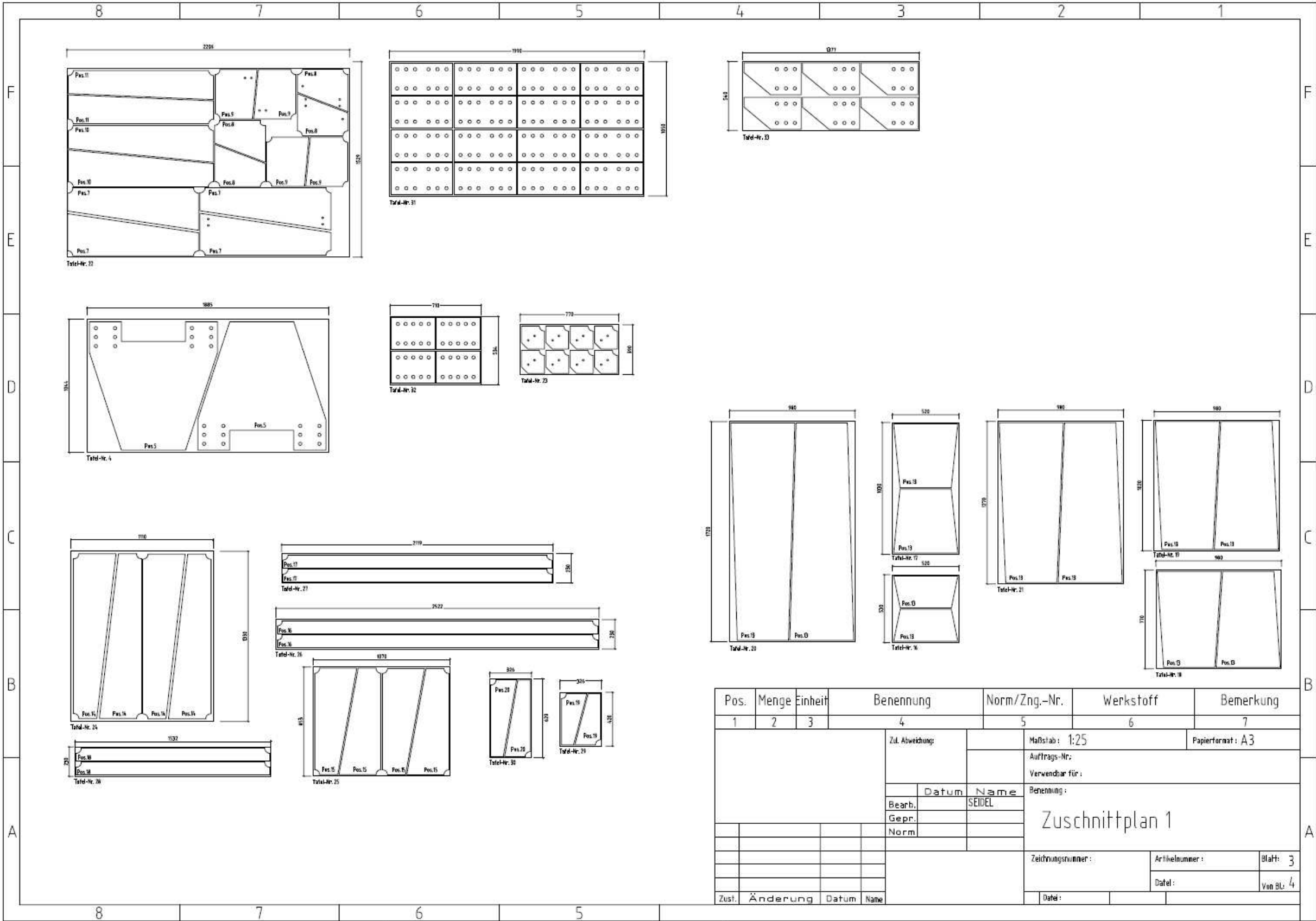
Tabelle 199: Aufstellung Kostenkalkulation - Fortsetzung 3



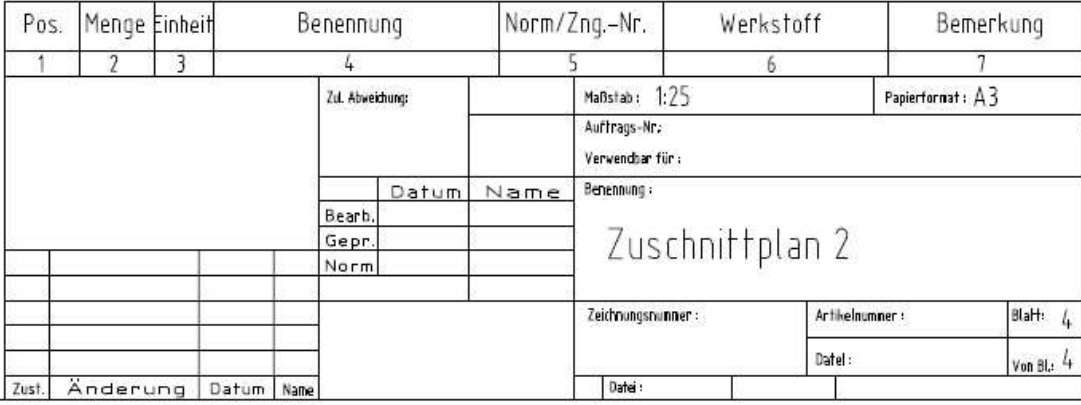
Zeichnung 1: Isometrie Vorbauschubel



Zeichnung 2: Einzelteile



Zeichnung 3: Zuschnittplan 1



Literaturverzeichnis

Normen

- [1] DIN 18800-1, *Bemessung und Konstruktion*, 11-2008
- [2] DIN 18800-2, *Stabilitätsfälle – Knicken von Stäben und Stabwerken*, 11-2008
- [3] DIN 18800-3, *Stabilitätsfälle – Plattenbeulen*, 11-2008
- [4] DIN 1055-1, *Wichten und Flächenlasten von Baustoffen, Bauteilen und Lagerstoffen*, 06-2002
- [5] DIN 1055-4, *Windlasten*, 03-2005
- [6] DIN 1055-8, *Einwirkungen während der Bauausführung*, 01-2003
- [7] DIN Fachbericht 101, *Einwirkungen auf Brücken*, 03-2009
- [8] DIN Fachbericht 103, *Stahlbrücken*, 03-2009
- [9] DAST-Richtlinie 015, *Träger mit schlanken Stegen*, Stahlbau-Verlagsgesellschaft, 1990
- [10] Richtlinie 804, *Eisenbahnbrücken*; 05-2003
- [11] DBS 918 002-02, *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen*, 12-2008

Literatur

- [12] Steifenlose Stahlskeletttragwerke und dünnwandige Vollwandträger, Ernst & Sohn, 1977
- [13] Schneider, *Bautabellen für Ingenieure*, 17. Auflage, Werner Verlag, 2006
- [14] Petersen, *Stahlbau*, Vieweg, 1988
- [15] Thiele/Lose, *Stahlbau 1*, 22. Auflage, Teubner, 1993
- [16] Wolfram Lohse, *Stahlbau 2*, 20. Auflage, Teubner, 2005
- [17] Handbuch RFEM 4.xx, Ing.-Software Dlubal GmbH
- [18] Handbuch RFSTABIL, Ing.-Software Dlubal GmbH
- [19] Fluidts® Produktinformationsbroschüre, Noell Service & Maschinentechnik GmbH
- [20] Krantabellenbuch Firma VAN SEUMEREN, 07-1998
- [21] Zeitschrift „Bauingenieure“, Band 80, 05-2005
- [22] Zeitschrift „Stahlbau“, Heft 3, Ernst & Sohn, 2008
- [23] Zeitschrift „Stahlbau“, Heft 11, Ernst & Sohn, 2000
- [24] Zeitschrift „Stahlbau“, Heft 2, Ernst & Sohn, 2006
- [25] Zeitschrift „Stahlbau“, Heft 5, Ernst & Sohn, 2007
- [26] Prospekt Elbebrücke Hämerten
- [27] Vorlesungsmitschriften Hochschule Mittweida/Roßwein, 2005-2009

Hilfsmittel / Software

- [28] RSTAB 5.xx, Dlubal Ingenieursoftware GmbH
- [29] RFEM 4, Dlubal Ingenieursoftware GmbH
- [30] Zusatzmodul RF-STABIL, Dlubal Ingenieursoftware GmbH
- [31] Zusatzmodul RF-MAT-NL, Dlubal Ingenieursoftware GmbH
- [32] AutoCAD 2005, Autodesk GmbH
- [33] ProSteel 3D V170, Kiwi Software GmbH

Internet

- [34] www.hebetec.de
- [35] www.enerpac.de
- [36] www.fahrenheit-is.com
- [37] www.TECHNAMATION-Winch.de
- [38] www.mammoet.com
- [39] www.ilsenburger-grobbleche.de

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur, Normen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Mittweida, den 11.01.2010

Martin Seidel

Danksagung

Einen besonderen Dank möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. T. Laufs für die Unterstützung und Betreuung meiner Arbeit aussprechen.

Gleiches gilt für Herrn Dipl.-Ing. U. Heiland, der mir es ermöglichte, dieses spannende Thema im Rahmen einer Diplomarbeit zu bearbeiten.

Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. P. Roßmeier, der mir bei Fragen stets mit Rat und Tat zur Seite stand.

Ebenso gilt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. H. Hobler, der mir durch die Beschaffung und Bereitstellung der notwendigen Soft- und Hardware meine Arbeit ermöglichte.

Meinen Lektoren, die ihre Weihnachtszeit zum Lesen meiner Arbeit geopfert haben, möchte ich ebenfalls herzlich Danken.